

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação de Desempenho de Protótipo de Seguimento Solar Passivo Biaxial

Daniela Simões Pereira

Trabalho realizado sob a supervisão de
Orientador: Miguel Centeno Brito (Universidade de Lisboa)
Co-orientador: José Mário Pó (Universidade de Lisboa)

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente

Dissertação

2015

Resumo

Nesta dissertação avaliou-se o desempenho de um protótipo de seguimento solar segundo dois eixos, sem consumo de eletricidade – seguimento passivo. O protótipo em estudo tira partido da variação de comprimento de um material, induzido pela expansão térmica, multiplicando-o num sistema mecânico de alavancas, as quais deverão orientar, em cada momento, o painel fotovoltaico na direção do sol. O seguimento solar fotovoltaico permite compensar a variação do ângulo de incidência do Sol, quer a nível sazonal, quer ao longo de um dia. Através da maximização da exposição solar, o ganho de energia médio anual é cerca de 30% em relação a um sistema fixo com inclinação e orientação ótimas. Este incremento deve, no entanto, compensar o consumo de energia relacionado com o seguimento, a manutenção e a fiabilidade do sistema, bem como o equipamento adicional necessário. Para avaliar a funcionalidade e o desempenho do protótipo, instalado no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, foram montados diversos instrumentos calibrados: sensores meteorológicos e de monitorização solar; bem como sensores de expansão térmica, de temperatura dos materiais e de posição do painel fotovoltaico. Realizaram-se ainda testes de desempenho elétrica, através da comparação das curvas IV de dois módulos diferentes (fixo e com seguimento). A monitorização efetuada entre Fevereiro e Junho permite concluir que o sistema de seguimento solar em estudo funciona, embora a afinação seja complexa. A melhor configuração testada apresentou uma diferença média diária de 34°, quando comparada com o seguimento solar ideal. Por outro lado, a avaliação elétrica mostrou-se inconclusiva, atendendo às características dos módulos utilizados nos testes e ao curto período de campanha. A validação dos dados da estação meteorológica demonstra a qualidade das medições de radiação global, direta e difusa.

Palavras-Chave: Fotovoltaico; Seguimento Solar Passivo; Desempenho PV

Abstract

The purpose of this thesis is to analyze a two axis solar tracking prototype, which does not need electricity consumption to track the sun – passive tracking. The prototype under study takes advantage of the length variation of a material, induced by thermal expansion by means of a lever mechanic system in order to redirect the PV panel towards the sun at each time. The photovoltaic solar tracking enables to compensate daily and seasonal deviation of the solar incidence angle. By maximizing the collection of solar exposure, the annual electric power gained increases on average 30% when compared to a fixed system. This increase must, however, be enough to compensate energy consumption related with the system's tracking, maintenance, reliability and additional equipment. In order to evaluate the functionality and the performance of the prototype installed in the Solar Campus of the Faculty of Sciences University of Lisbon, several calibrated instruments were assembled: weather sensors and a solar monitoring station; as well as thermal expansion, temperature and photovoltaic panel position sensors. Experimental tests were performed to evaluate the electric performance, by comparing the IV curves of two different modules (fixed and with tracking). The monitoring campaign carried out between February and June showed that the passive solar tracking system works, although the pitch is complex. The best result was on average a daily difference of about 34°, when compared to an ideal solar tracking. On the other hand, the electric assessment proved to be inconclusive given the characteristics of the modules used in the tests and due to the short period of experimental campaign. The quality of global, direct and diffuse radiation measurements were demonstrated through weather station data validation

Keywords: Photovoltaic; Passive Solar Tracking, PV Performance

Índice

Resumo.....	ii
Abstract	ii
Índice de Figuras	4
Índice de Tabelas.....	7
Agradecimentos.....	8
Simbologia e Notações.....	9
Capítulo 1 – Introdução.....	12
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.....	13
2.1. Energia Solar	13
2.2. Seguimento Solar	18
2.3. Estado da Arte	20
Capítulo 3 - Descrição do Protótipo	22
3.1. Patente	22
3.2. Conceitos Mecânicos.....	23
3.3. Localização	25
Capítulo 4 – Metodologia.....	27
4.1. Modelo Teórico	27
4.2. Desempenho em Ambiente Real	33
4.2.1. Sistema de Monitorização e Aquisição de Dados	33
4.2.2. Estação Meteorológica	37
4.2.3. Desempenho Elétrico	39
Capítulo 5 – Resultados	41
5.1. Qualidade dos dados da Estação Meteorológica	41
5.2. Campanha Experimental	45
5.2.1. Qualidade do Seguimento	49
5.2.2. Configurações R13 e R18 a.....	50
5.3. Validação do Modelo Teórico.....	52
5.4. Caracterização do Desempenho Elétrico.....	53
Capítulo 6 – Discussão.....	56
Capítulo 7 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	57
Referências Bibliográficas	58

Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição espectral da radiação solar. Fonte: [5]	13
Figura 2 - Esquema representativo do conceito <i>Air Mass</i> e atenuação da radiação solar. Adaptado de [8].	14
Figura 3 - Variação da altura solar em função do azimute solar.	15
Figura 4 - Efeito do aumento (sentido da setas) de irradiância (a) e de temperatura da célula (b) na curva IV. Fonte: [15].	18
Figura 5 - Em cima: comparação da irradiância global média mensal incidente num sistema fixo e num sistema com seguimento solar em dois eixos. Em baixo: diferença média entre as duas variáveis. Fonte: PVGIS [17].	18
Figura 6 - Energia perdida em função da amplitude máxima do seguimento em comparação com o seguimento ideal. Fonte: [19].	19
Figura 7 - Esquema representativo dos tipos de seguimento solar. Adaptado de: [20] [21].	19
Figura 8 - Sistemas de seguimento solar passivo por diferença de pressão de um fluido (à esquerda); atuadores de ligas metálicas com memória (no centro) e atuadores de nanocompósitos foto-termomecânicos (à direita). Fonte: [16], [23] e [24].	21
Figura 9 - Esboço do protótipo do SEG SOL. Fonte: [25] e [26]	22
Figura 10 - Perspetiva do sistema de alavancas. Fonte: [27]	23
Figura 11 - À esquerda: fotografia do sistema de alavancas orientado a Sul. À direita: esquema do funcionamento das alavancas – o esquema não está à escala, serve apenas para representar o efeito do deslocamento da placa de alumínio, bem como a vantagem mecânica gerada. Adaptado de [27].	24
Figura 12 - Esquema representativo da disposição do Campus Solar da FCUL, com destaque para a localização do protótipo do SEG SOL e da estação meteorológica.	25
Figura 13 - Sombreamento previsto no Campus Solar para dia 21 de Junho às 12h (I) e às 18h (II); para dia 21 de Dezembro às 12h (III) e às 16h (IV).	26
Figura 14 - À esquerda: vista a partir de Sul do protótipo; ao centro: vista de Norte do protótipo e da luminária; à direita: vista em pormenor do quadro elétrico.	26
Figura 15 - Esquema ilustrativo da metodologia adotada para avaliação de desempenho do sistema de seguimento solar.	27
Figura 16 - Comparação entre a irradiância global no plano horizontal estimada através do modelo teórico e a informação extraída de dados de satélite para o mesmo local. O eixo secundário ilustra a diferença absoluta entre ambas.	28
Figura 17 - Estimativa da irradiância global incidente nas placas de alumínio para um ano típico. Cima: placa Este; Centro: placa Sul; Baixo: placa Oeste.	28
Figura 18 - Estimativa da irradiância incidente nas placas de alumínio para um dia típico de Verão.	29
Figura 19 - Estimativa da temperatura das placas para um dia típico de Primavera, Verão, Outono e Inverno, através da aplicação do conceito de balanço térmico num volume de controlo.	31
Figura 20 - Estimativa da expansão térmica absoluta das placas de alumínio para um dia típico de Primavera, Verão, Outono e Inverno.	31

Figura 21 - Fotografias em pormenor do sistema de alavancas, pontos de apoio no painel PV e possíveis ajustes da configuração: calhas, tubos e braços das alavancas.	32
Figura 22 - Comparação entre a trajetória do sol e a atitude prevista do plano do painel para o dia 21 de Junho. Os vetores normais ao Sol (linhas a cheio) e os vetores normais ao painel fotovoltaico instalado no protótipo (linhas a tracejado) são estimados para o intervalo entre as 8h e as 20h (hora solar) com base no modelo radiativo e na expansão térmica das barras de alumínio, respetivamente.	33
Figura 23 - Esquema representativo da configuração do sistema de monitorização.	34
Figura 24 - Sensores Ibutton dispostos ao longo da face interior das placas de alumínio. As setas assinadas na imagem representam os três pontos de medição: na base, no centro e no topo de cada placa. O suporte do sensor foi fixo com cola quente e fio de arame, substituído posteriormente por fita-cola.	34
Figura 25 - À esquerda: fotografia do inclinómetro instalado por baixo do painel fotovoltaico; fixo com braçadeiras convencionais à estrutura de ligação entre o painel e o sistema de alavancas. À direita: esquema representativo do funcionamento do sensor e medição da inclinação segundo os dois eixos.	35
Figura 26 - DAQ <i>National Instruments</i> e respetivas ligações elétricas aos sensores e ao PC. O aparelho está instalado na casa de apoio, localizada no Campus Solar.	35
Figura 27 - Extensómetro instalado entre a placa Sul e o mastro de suporte do protótipo SEGSOL. À esquerda: vista de cima da placa Sul. À direita: vista em pormenor das peças de suporte do extensómetro. O sensor encontra-se no interior de uma peça de acrílico (ligada ao mastro por dois parafusos) e preso a uma peça de latão (enroscada na peça de ligação entre a placa Sul e a alavanca correspondente). Instalação idêntica foi aplicada nas placas Este e Oeste.	36
Figura 28 - Curvas de calibração dos extensómetros.	36
Figura 29 - Esquema representativo da configuração experimental da estação meteorológica instalada no Campus da FCUL (à esquerda) e fotografia (à direita).	37
Figura 30 - <i>Printscreen</i> do programa de aquisição de dados <i>Loggernet</i> . Em cima à esquerda: temperatura ambiente; em cima à direita: painel de controlo do programa; em baixo à esquerda: velocidade média do vento; em baixo à direita: irradiância global, direta e difusa.	39
Figura 31 - Módulo fixo utilizado nos testes experimentais (à esquerda); traçador de curvas IV e seletor de módulos e respetivas ligações elétricas (ao centro e à direita).	40
Figura 32 - Comparação entre a irradiância extraterrestre calculada e a irradiância medida pela estação meteorológica, no plano normal (em cima) e no plano horizontal (em baixo). Intervalo: 17/01/2015 a 01/02/2015.	41
Figura 33 - Vista em pormenor da Figura 28, com identificação de períodos do dia em que a irradiância medida é superior à irradiância extraterrestre. As setas identificam o efeito do cosseno e a reflexão das nuvens para um dia do mês de Janeiro. Intervalo: 23/01/2015 a 24/01/2015.	42
Figura 34 - Comparação entre a irradiância global no plano horizontal medida pela estação meteorológica e calculada pelo somatório da componente direta e difusa. Intervalo: 17/01/2015 a 01/02/2015.	42
Figura 35 - A: Diferença média horária entre GHI de fecho e GHI medido, evidência do efeito do cosseno. B: Aproximação no eixo das ordenadas (diferença média horária). Intervalo: 17/01/2015 a 21/04/2015.	43

Figura 36 - Controlo de qualidade dos dados de radiação solar de minuto em minuto. Fração difusa em função de kt (à esquerda) e kb em função de kt (à direita). Intervalo: 17/01/2015 a 21/04/2015.....	44
Figura 37 - Ajuste dos braços das alavancas. As setas representam o sentido do deslocamento dos parafusos da posição mínima para a posição máxima.....	47
Figura 38 - Ajuste dos tubos. As setas representam as três disposições possíveis dos tubos que estabelecem a ligação entre as alavancas e o painel.....	48
Figura 39 - Ajuste da posição da calha. A posição dos parafusos é contabilizada a partir do interior, podendo variar entre 1 e 10 - o número de furos de cada calha. O parafuso de referência é o mais próximo do centro.	48
Figura 40 - Quantificação da diferença entre o seguimento teórico e o seguimento real, através do produto interno de vetores – média da diferença entre as 8h e as 19h (I) e para diferentes períodos do dia (II).....	49
Figura 41 - A: Atitude do painel fotovoltaico instalado no protótipo, segundo o eixo Norte/Sul e Este/Oeste. B: Irradiância no plano normal aos raios solares. C: Expansão térmica das placas Este, Sul e Oeste. D: Diferença de temperatura entre as placas e o mastro. Campanha de monitorização da configuração 13, período compreendido entre 14/05/2015 e 18/05/2015.....	50
Figura 42 - A: Atitude do painel fotovoltaico instalado no protótipo, segundo o eixo Norte/Sul e Este/Oeste. B: Irradiância no plano normal aos raios solares. C: Expansão térmica das placas Este, Sul e Oeste. D: Diferença de temperatura entre as placas e o mastro. Campanha de monitorização da configuração 18 a, período compreendido entre 17/06/2015 e 19/06/2015.....	51
Figura 43 - Qualidade do seguimento solar das configurações 13 (A e B) e 18 a (C e D), através da comparação entre a trajetória do Sol e a trajetória do painel do protótipo.....	51
Figura 44 - Comparação entre a temperatura da placa medida e estimada a partir do modelo teórico para a placas orientadas a Este (A), Sul (B) e Oeste (C). Dia típico de Verão: 21/06/2015.	52
Figura 45 - Comparação entre a diferença de expansão térmica medida e estimada a partir do modelo teórico para a placas orientadas a Este (A), Sul (B) e Oeste (C). Dia típico de Verão: 21/06/2015.....	52
Figura 46 - (A) Comparação das curvas de corrente em função da tensão; (B) potência em função da tensão do protótipo com um sistema fixo com inclinação de 34 ° e orientado a Sul. Curvas traçadas no dia 18 de Junho de 2015; às 10h, 13h e 17h.....	53
Figura 47 - (A) Comparação horária da densidade de corrente entre o protótipo e o sistema fixo. A curva a cheio representa a média dos 3 dias de campanha (os pontos representam as medições horárias realizadas). (B) Normalização das curvas de densidade de corrente do protótipo e do sistema fixo. (C) Irradiância global teórica prevista pelo modelo teórico para o plano do seguimento e do plano fixo. Intervalo: 17/06/2015 a 19/06/2015.	54
Figura 48 - Média da potência máxima dos módulos fixo e do SEGSOL. Intervalo: 17/06/2015 a 19/06/2015.....	54
Figura 49 - Comparação da energia diária produzida pelo sistema fixo e de seguimento, em comparação com estimativas do PVGIS para um seguimento de dois eixos, de um eixo inclinado segundo 36° e um sistema fixo com inclinação 34° e orientação Sul.	55

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Constantes físicas utilizadas no modelo teórico.....	30
Tabela 2 - Principais especificações dos sensores de radiação.	38
Tabela 3 - Principais especificações dos sensores instalados no WS 500.....	38
Tabela 4 - Características elétricas dos módulos fotovoltaicos nas condições STC - especificações recolhidas das <i>datasheets</i> do módulo MPrime, fornecido pela Martifer e instalado no protótipo [32] e do módulo fixo Sanyo, instalado no Campus Solar [33].....	40
Tabela 5 - Intervenções e testes de monitorização efetuados entre Janeiro e Junho de 2015.	45

Agradecimentos

Agradeço ao Jorge e à Celeste por me terem dado a oportunidade que não tiveram; à Andreia, à Joana e à Lola pelo companheirismo de uma vida; ao Tiago por me ter ensinado, entre muitas outras coisas, que o que custa não é viver, mas sim saber viver; aos amigos, poucos, loucos e verdadeiros, que teimam em não desaparecer; à avó Júlia que é a mulher mais forte que tive o prazer de conhecer; ao Mário Pó e ao Prof. Miguel Brito pela orientação e, finalmente, a todos – e foram muitos - os que me ajudaram a colocar o seguidor no sítio sempre que foi preciso. Obrigado!

Simbologia e Notações

α	Altura Solar (°)
α	Coefficiente de Temperatura de Corrente (%/°C)
α_{Al}	Absortividade do Alumínio
β	Coefficiente de Temperatura de Tensão (%/°C)
β	Inclinação (°)
γ	Ângulo Azimutal (°)
γ	Coefficiente de Temperatura de Potência (%/°C)
ΔE_{stg}	Variação de Energia Acumulada
δ	Declinação Solar (°)
ε_{AL}	Emissividade do Alumínio
η	Eficiência
θ_i	Ângulo de Incidência (°)
θ_z	Ângulo Zenital (°)
λ	Ângulo da diferença entre o seguimento teórico e o prático (°)
ρ_{AL}	Massa Volúmica do Alumínio (Kg/m ³)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (W/(m ² .K ⁴))
τ	Amplitude do Ângulo (rad)
φ	Azimuth Solar (°)
ω	Ângulo horário Solar (°)
$\nless NS$	Ângulo Formado entre o Eixo Norte/Sul e o Plano do Pannel (°)
$\nless EO$	Ângulo Formado entre o Eixo Este/Oeste e o Plano do Pannel (°)
A	Área do Módulo
AM	<i>Air Mass</i>
AST	Active Space Technologies
Bi	Número de Biot
c_{AL}	Calor Específico do Alumínio (J/(Kg.K))
CET	Coefficiente de Expansão Térmica (µm/m/K)
CPV	Concentração Fotovoltaica
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DHI_0	<i>Extraterrestrial Diffuse Horizontal Irradiance</i>
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i>

$D_{ho^{ref}}$	Componente da Refração Atmosférica
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>
DNI_0	<i>Extraterrestrial Direct Normal Irradiance</i>
dr	Espessura Ótica de Rayleigh
E_g	Energia Térmica Gerada
E_{in}	Energia que Entra num Volume de Controlo
E_{out}	Energia que Sai de Volume de Controlo
ERC	Elementos Resistivos ao Calor
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FF	<i>Fill Factor</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>
GHI_0	<i>Extraterrestrial Global Horizontal Irradiance</i>
h_c	Coefficiente Convectivo ($W/(m^2.K)$)
ho^{ref}	Correção da altura solar ($^\circ$)
I	Corrente (A)
I_{MPP}	Corrente no ponto de potência máxima (A)
I_{sc}	Corrente de Curto-Circuito (A)
J_{cs}	Densidade de Corrente de Curto-circuito (mA/cm^2)
k_{AL}	Condutividade Térmica do Alumínio ($W/(m.K)$)
k_b	<i>Beam Clearness Index</i>
k_t	<i>Clearness Index</i>
L	Comprimento Característico da Placa
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
m	Massa de ar ótica relativa
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
N	Dia do ano
P_{max}	Potência máxima (W)
POA	<i>Plane of Array</i>
PV	Fotovoltaico
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
R	Distância entre a Terra e o Sol
R_m	Distância Média entre a Terra e o Sol
S	Constante Solar = $1367 W.m^{-2}$

SoDa	<i>Solar Radiation Data</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
T	Temperatura
T_{LK}	Fator de turbidez atmosférica de Linke
ts	Hora solar (h)
UTD	Unidade de transmissão de deslocamento
V	Volume
V	Tensão (V)
V_{MPP}	Tensão no ponto de potência máxima (V)
V_{OC}	Tensão em Circuito Aberto (V)
z	Elevação (m)

Capítulo 1 – Introdução

Atendendo à atual conjuntura energética, a energia solar, nomeadamente a tecnologia solar fotovoltaica para produção de energia elétrica, representa uma oportunidade de aproveitamento de um recurso com um vasto potencial como o sol; “a única limitação deverá ser a imaginação, a habilidade tecnológica e a determinação política” [1].

Os sistemas fotovoltaicos (PV) tiram partido do efeito fotoelétrico que ocorre ao nível das células solares, constituídas por materiais capazes de produzir corrente elétrica quando expostos à radiação solar. O desempenho das células fotovoltaicas depende de diversos fatores, tais como a temperatura de operação, a intensidade de radiação incidente e o ângulo de incidência da radiação solar. O seguimento solar ideal permite posicionar o módulo numa posição ótima, perpendicular à radiação solar em cada momento, compensando as alterações ao nível da altura e do azimute solar ao longo do dia, bem como os desvios sazonais, aumentando a energia anual captada até cerca de 40% [3] [4]. De forma idêntica a outros ramos da ciência, a investigação evolui em diferentes frentes com a finalidade de maximizar o aproveitamento e minimizar os custos, quer seja na procura de novos materiais para produzir células solares, no melhoramento da desempenho da própria célula, na otimização da exposição solar ou na redução dos custos de produção.

O processo fotoquímico que ocorre nas células do girassol, fazendo deslocar iões dos tecidos devido a diferenças de concentração, consiste na resposta a um estímulo exterior por ação da luz; denomina-se heliotropismo. Este mecanismo permite ao girassol seguir o sol ao longo do dia, obrigando a planta a encontrar constantemente uma posição de equilíbrio. O movimento natural descrito serve de inspiração à invenção do protótipo em estudo, cuja finalidade é seguir a trajetória do sol de forma passiva, garantindo a incidência perpendicular dos raios solares nos painéis fotovoltaicos, sem gastos adicionais de eletricidade.

A presente dissertação insere-se no âmbito do projeto SEGSQL – Seguidor solar biaxial passivo; este consiste no *design*, prototipagem e validação de um mecanismo inovador de seguimento solar passivo, cujo propósito é melhorar a eficiência de sistemas fotovoltaicos. Os principais objetivos do projeto em questão são:

- Identificar o grau de inovação do projeto, através de um estudo do estado da arte;
- Investigar e desenvolver materiais e componentes;
- Construir protótipos, pré-series e instalação experimental;
- Avaliar a funcionalidade e desempenho do protótipo.

Tratando-se de uma parceria entre três entidades: a Active Space Technologies (AST) desenvolve a componente mecânica, a Martifer Solar é responsável pela componente elétrica e a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) tem como função monitorizar o protótipo em ambiente real, assegurando o cumprimento do último tópico dos objetivos do projeto acima referidos [4].

Os principais objetivos da dissertação são os seguintes:

- Instalação e monitorização da estação meteorológica, instalada no Campus Solar da FCUL.
- Avaliação da qualidade de dados de radiação adquiridos pela estação e respetiva validação.
- Elaboração de um modelo teórico que represente o funcionamento do protótipo e respetiva comparação com medições reais.
- Avaliação da funcionalidade e do desempenho do protótipo, através da análise dos resultados obtidos na sequência de intervenções práticas no terreno.

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

O presente capítulo tem como objetivo introduzir e clarificar os conceitos teóricos necessários à compreensão do trabalho realizado, bem como apresentar o estado de arte do tema alvo de estudo.

2.1. Energia Solar

A energia proveniente do sol, sob a forma de fótons (ou ondas eletromagnéticas), chega à superfície da terra após atravessar a atmosfera terrestre, sofrendo ao longo do percurso a ação de diversos processos físicos entre os quais se destacam a absorção, a transmissão e a dispersão, provocados pela interação com os componentes atmosféricos - aerossóis, partículas de pó e gases atmosféricos. A Figura 1 representa o espectro de emissão da radiação solar no topo da atmosfera e à superfície terrestre, por comparação com a distribuição espectral de um emissor ideal a 5800 K – denominado corpo negro; qualquer superfície real emite menos do que o corpo negro à mesma temperatura. A diferença entre as curvas do espectro à superfície e extraterrestre evidenciam as bandas de absorção da radiação solar por parte de alguns gases, como é o caso do vapor de água, do dióxido de carbono, do oxigênio e do ozônio. Ainda assim, a maioria da radiação concentra-se na região dos comprimentos de onda mais curtos, atingindo o máximo quando o comprimento de onda é cerca de $0,5 \mu\text{m}$ [5].

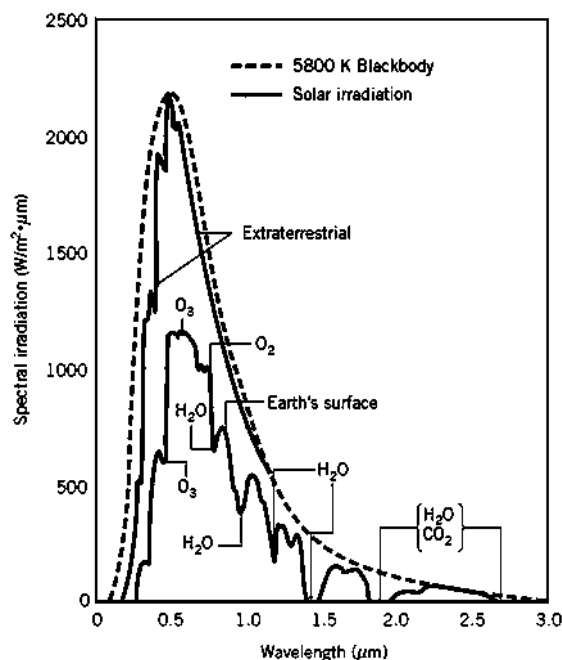


Figura 1 - Distribuição espectral da radiação solar. Fonte: [5]

Outro fator a ter em conta na redução da potência da radiação, e, consequentemente, no seu espectro de emissão, é a distância que esta tem de atravessar através da atmosfera, conhecido como *Air Mass* (AM). A massa de ar varia tendo em conta a posição relativa do sol e fornece uma medida da atenuação da atmosfera – quando maior o ângulo formado entre a posição do sol e o zénite (eixo definido pela normal à horizontal), maior será o percurso percorrido pelos fótons, maior será a probabilidade de ocorrer um dos processos acima referidos. AM0 refere-se à situação em que não existe atmosfera – utilizado em sistemas aeroespaciais, por exemplo; AM1 diz respeito à espessura da atmosfera (cerca de 100 Km), ou seja, o sol está alinhado com o zénite e, à medida que este se aproxima do horizonte, a massa de ar varia com o inverso do cosseno do ângulo entre o zénite e o sol, representado na Figura 2. A curva espectral considerando AM1,5 é comumente utilizada como referência para aplicações à superfície terrestre. Corresponde à amplitude de cerca de 48° do zénite e irradiância de 1000 W/m^2 [6]. A irradiância é a potência radiativa por unidade de área, resultado da integração do fluxo de radiação segundo os diferentes comprimentos de onda. Esta pode dividir-

se em várias componentes: a componente direta - irradiância proveniente diretamente do disco solar, denominada *direct normal irradiance* (DNI) e a componente difusa – irradiância proveniente de todas as direções do céu exceto do disco solar, designada *diffuse horizontal irradiance* (DHI). O somatório das duas componentes corresponde à *global horizontal irradiance* (GHI). Recorrendo às relações trigonométricas é possível transpor qualquer uma das componentes da irradiância para o plano pretendido. Quando este plano é diferente da horizontal, deve ser contabilizada a componente da reflexão do solo - efeito provocado pelo albedo da superfície envolvente onde incide a radiação solar; a contribuição desta componente é geralmente pequena, podendo requerer especial ponderação em locais com coeficientes de reflexão do solo tipicamente elevados (como é o caso superfícies cobertas de neve). [1] [7]

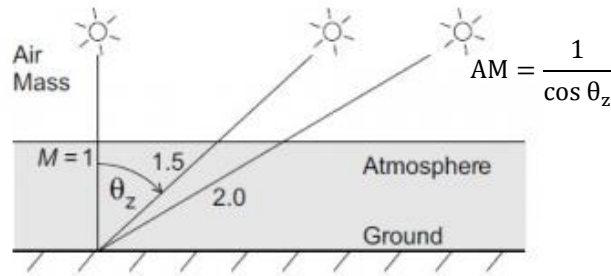


Figura 2 - Esquema representativo do conceito *Air Mass* e atenuação da radiação solar. Adaptado de [8].

Inúmeros algoritmos têm vindo a ser desenvolvidos com o objetivo de determinar com elevada precisão a posição do sol relativamente a um local na superfície terrestre. Estes adquirem especial relevância no dimensionamento de sistemas solares (térmicos e fotovoltaicos), na medida em que permitem prever possíveis efeitos de sombreamento da envolvente [9], bem como avaliar o potencial de exposição solar de um dado local.

A trajetória aparente do sol no céu, representada na Figura 3, é assim definida pela altura solar (α) – ângulo formado entre o sol e o horizonte - e pelo azimute solar (φ) – ângulo formado entre a orientação Sul e a projeção do sol no plano horizontal. Ambas as variáveis dependem do local, da hora e do dia do ano, podendo ser expressas em função de:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \omega \cos \phi) \quad (1)$$

e

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right) \quad (2)$$

O ângulo complementar da altura solar denomina-se ângulo zenital θ_z :

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (3)$$

onde δ é a declinação - ângulo entre a linha que une os centros da Terra e do Sol e o plano equatorial, atinge o máximo e mínimo nos Solstícios de Verão e de Inverno respetivamente:

$$\delta = \sin^{-1}\{0,39795 \cos[0,98563 (N - 173)]\} \quad (4)$$

N é o dia do ano, em que $N \in [1, 365]$ dias

ω é o ângulo horário solar – ângulo calculado através da hora solar:

$$\omega = 15(ts - 12) \quad (5)$$

ts é a hora solar, em que $ts \in [0,24]$ horas.

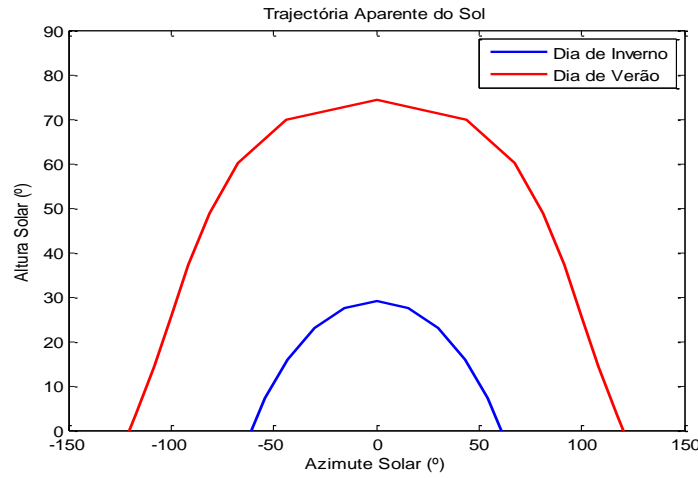


Figura 3 - Variação da altura solar em função do azimute solar.

A irradiância direta média que atinge a superfície da atmosfera, conhecida como constante Solar (S) toma o valor de 1367 W.m^{-2} , deverá ser corrigida tendo em conta a variação da distância entre a Terra e o sol (R), devido à órbita da Terra. Assim, a irradiância extraterrestre normal corrigida (DNI_0) depende do dia do ano considerado:

$$DNI_0 = S (R_m/R)^2 \quad (6)$$

onde

$$(R_m/R)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos(\tau) + 0,001280 \sin(\tau) + 0,000719 \cos(2\tau) + 0,000077 \sin(2\tau) \quad (7)$$

e

$$\tau = \frac{2\pi N}{365} \quad (8)$$

R_m é a distância média entre a Terra e o sol, τ é a amplitude do ângulo em radianos do dia N considerado.

Para determinar a irradiância global extraterrestre no plano horizontal (GHI_0) transpõe-se a componente direta para o plano, visto que a componente difusa é desprezável ($AM0$) [10], pelo que a expressão (9) pode ser simplificada na expressão (10):

$$GHI_0 = DNI_0 \cos \theta_z + DHI_0 \quad (9)$$

$$GHI_0 = DNI_0 \cos \theta_z \quad (10)$$

Utilizando o método de cálculo desenvolvido em [11] é possível estimar a irradiância no plano normal aos raios solares que chega à superfície da Terra (DNI) após atravessar a atmosfera, atenuada pela massa de ar:

$$DNI = DNI_0 \exp[-0,8662 T_{LK} m \text{ dr}(m)] \quad (11)$$

Em que T_{LK} é o fator de turbidez atmosférica de Linke, m é a massa de ar ótica relativa e $dr(m)$ é a espessura ótica de Rayleigh a uma dada massa de ar.

A massa de ar (m) é calculada através de:

$$m = \left(\frac{p}{p_0} \right) / \left[\sin ho^{ref} + 0,50572 (ho^{ref} + 6,07995)^{-1,6364} \right] \quad (12)$$

Onde ho^{ref} é a correção da altura solar em graus.

$$ho^{ref} = \alpha + D_{ho^{ref}} \quad (13)$$

α é a altura solar em graus e $D_{ho^{ref}}$ representa a componente da refração atmosférica, dada por:

$$D_{ho^{ref}} = \frac{0,061359(0,1594 + 1,123 \alpha + 0,065656 \alpha^2)}{(1 + 28,9344 \alpha + 277,3971 \alpha^2)} \quad (14)$$

Para uma dada elevação em metros (z):

$$\left(\frac{p}{p_0} \right) = \exp \left(\frac{-z}{8434,5} \right) \quad (15)$$

O fator de turbidez de Linke descreve a espessura ótica de atmosfera causada pela absorção através de vapor de água e absorção e dispersão provocada pelas partículas de aerossóis numa atmosfera de céu limpo. Este fator reflete a atenuação da radiação solar direta extraterrestre. Os valores médios mensais de T_{LK} para a cidade de Lisboa, entre outras, podem ser consultados em [12].

O parâmetro $dr(m)$ é determinado por:

$$dr(m) = 1/(6,6296 + 1,7513 m - 0,1202 m^2 + 0,0065 m^3 - 0,00013 m^4) \quad (16)$$

, para $dr(m) \leq 20$

$$dr(m) = 1/(10,4 + 0,718 m) \quad , \text{ para } dr(m) > 20 \quad (17)$$

Conhecendo a irradiância direta que chega à superfície da Terra (DNI) para cada hora do ano, bem como a posição do sol no céu para determinado lugar (α e φ), é possível determinar a irradiância que incide numa superfície inclinada segundo um ângulo β em relação à horizontal e orientada segundo um certo azimute γ .

O ângulo de incidência, formado pela normal a uma superfície fixa inclinada e os raios solares, designa-se por θ_i e pode ser calculado do seguinte modo:

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - \varphi) \quad (18)$$

Assim, a componente direta da irradiância incidente numa qualquer superfície ($DNI_{\beta,\gamma}$) calcula-se através de:

$$DNI_{\beta,\gamma} = DNI \cos \theta_i \quad (19)$$

Através do modelo isotrópico de *Liu Jordan* [13], obtém-se a componente difusa da irradiância no plano horizontal (DHI):

Partindo de:

$$K_d = 0,2710 - 0,239K_D \quad (20)$$

Onde

$$K_d = \frac{DHI}{GHI_0} \quad (21)$$

$$K_D = \frac{GHI - DHI}{GHI_0} = \frac{DNI \cos \theta_z}{GHI_0} \quad (22)$$

Substituindo as equações (21) e (22) em (20) obtém-se uma estimativa de DHI:

$$DHI = 0,2710 GHI_0 - 0,239 DNI \cos \theta_z \quad (23)$$

De notar que a irradiância difusa inclui a componente relativa à reflexão do solo.

A transposição da irradiância difusa para um plano definido por (β, γ) é dada por:

$$DHI_{\beta, \gamma} = DHI \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (24)$$

Finalmente, a irradiância global numa superfície inclinada resulta do somatório da componente direta com a componente difusa:

$$GHI_{\beta, \gamma} = DNI_{\beta, \gamma} + DHI_{\beta, \gamma} \quad (25)$$

A compreensão da geometria solar adquire especial relevância no domínio da tecnologia fotovoltaica, onde a energia de um fóton pode ser convertida em energia elétrica pelas células solares, através do efeito fotoelétrico. A absorção de um fóton gera uma corrente elétrica, medida em Ampere (A) e uma tensão medida em Volt (V), capazes de fornecer potência elétrica quando aplicada uma carga externa. Diversos parâmetros extraídos da curva IV (corrente em função da tensão) são utilizados para caracterizar o funcionamento das células solares, tais como a corrente de curto-circuito (I_{sc}); a tensão em circuito aberto (Voc), o *fill factor* (FF), a potência máxima (Pmax) e a eficiência (η) [6]. Entenda-se por corrente de curto-circuito: a corrente é máxima e a tensão nula; por tensão em circuito aberto: a tensão é máxima e a corrente é nula; por potência: o produto da tensão pela corrente elétrica e por eficiência: a razão entre a potência máxima fornecida por uma célula solar e a potência radiativa incidente. Paralelamente, o desempenho de um módulo fotovoltaico (associação elétrica de várias células solares) depende das condições de operação, nomeadamente da irradiância, da distribuição espectral da radiação incidente e da temperatura das próprias células. Em termos práticos, nem sempre se verificam as condições padrão - *Standard Test Conditions* (STC): irradiância 1000 W/m²; temperatura de operação 25 °C e AM1.5. A Figura 4 ilustra o efeito da radiação e da temperatura na desempenho elétrica de uma célula. Enquanto a corrente de curto-circuito aumenta linearmente com o aumento de radiação solar, o Voc aumenta logaritmicamente. Em contrapartida, o aumento de temperatura afeta principalmente a tensão em circuito aberto, refletindo-se na redução da eficiência da célula silício cristalino em cerca de 0,45 %, por cada aumento de 1 °C [14].

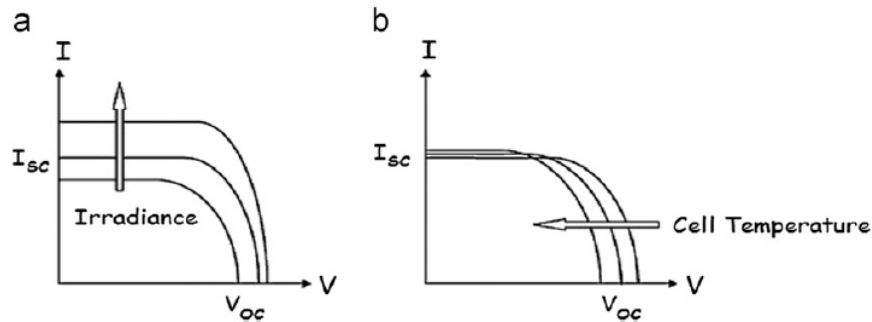


Figura 4 - Efeito do aumento (sentido das setas) de irradiância (a) e de temperatura da célula (b) na curva IV. Fonte: [15]

2.2. Seguimento Solar

O seguimento solar permite variar a posição do painel fotovoltaico, de forma a seguir a trajetória relativa do sol, maximizando assim a captação de energia solar. Os principais objetivos da sua implementação residem no aumento da eficiência global do sistema e da produção elétrica, na redução do tamanho do sistema, nomeadamente a área de módulos instalados, e no custo por unidade de energia (€/kWh) [16]. Admitindo um seguimento ideal, o ângulo de incidência é aproximadamente nulo, pelo que a irradiância normal incidente na superfície do painel fotovoltaico é, em cada momento, máxima e igual a DNI. Assim, a redução do ângulo de incidência θ_i maximiza a expressão (19).

O modelo *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS), bastante utilizado pela comunidade pv, permite a avaliação geográfica do recurso solar, bem como do desempenho fotovoltaico, baseando-se em ferramentas dos sistemas de informação geográfica e em modelos radiativos. Os gráficos da Figura 5 ilustram a irradiância prevista pelo modelo do PVGIS [17] num painel fotovoltaico instalado na cidade de Lisboa, com e sem aplicação de seguimento. A diferença entre as duas curvas chega aos 38% no mês de Junho, sendo a diferença média anual cerca de 30%.

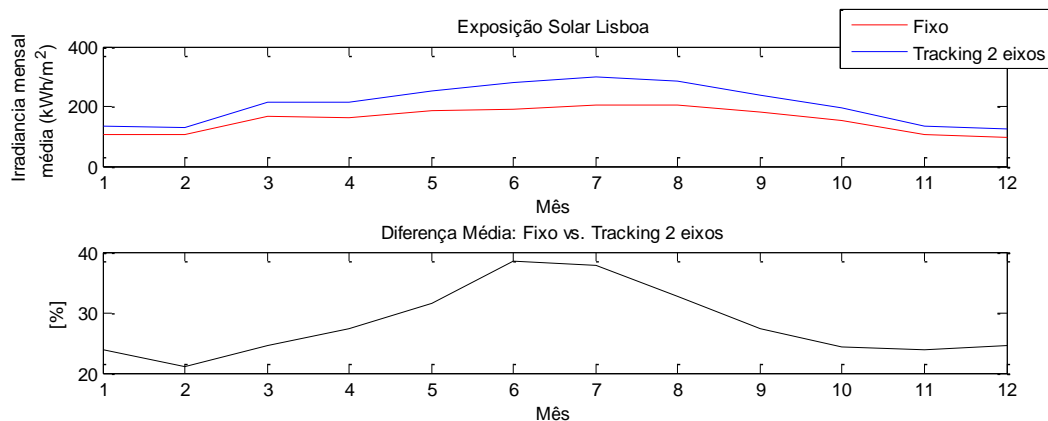


Figura 5 - Em cima: comparação da irradiância global média mensal incidente num sistema fixo e num sistema com seguimento solar em dois eixos. Em baixo: diferença média entre as duas variáveis. Fonte: PVGIS [17]

Exceção feita aos sistemas de concentração fotovoltaica (CPV), o seguimento não tem de ser exato para aumentar a potência elétrica à saída de um sistema PV, conforme ilustrado na Figura 6. O ganho de potência em relação a um sistema fixo convencional varia entre 15 a 40%, dependendo da configuração adotada, sendo mais efetivo ao início e ao final do dia. Isto acontece porque a otimização de um sistema fixo é tal que ao meio dia solar este deve estar posicionado perpendicularmente aos raios solares, pelo que o ganho de potência é substancialmente superior noutros períodos do dia [18]. O mesmo estudo evidencia a relação entre a irradiância e a temperatura

de operação e a curva característica IV dos módulos testados sob as mesmas condições ambiente, segundo diferentes métodos de seguimento.

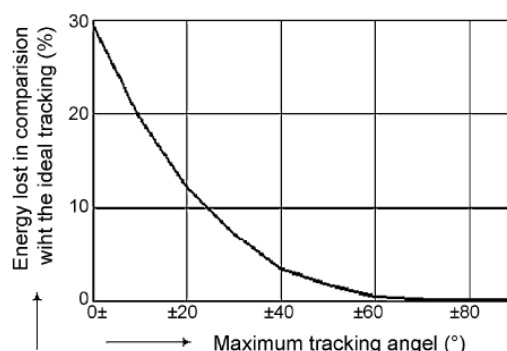


Figura 6 - Energia perdida em função da amplitude máxima do seguimento em comparação com o seguimento ideal.
Fonte: [19]

De um modo geral, os sistemas de seguimento classificam-se quanto ao tipo: um eixo (horizontal, vertical ou inclinado) ou dois eixos (biaxial) e quanto ao modo de operação: ativo ou passivo. O esquema da Figura 7 ilustra as principais configurações utilizadas para seguir o sol, estas privilegiam, conforme as condicionantes do local e do utilizador, maior adequação diária e/ou sazonal. Um exemplo de adequação diária é o sistema de seguimento Este/Oeste, pois permite acompanhar a trajetória do sol desde o nascer ao ocaso. Em contrapartida, a variação da posição do painel PV segundo Norte/Sul potencia o ajuste sazonal: no Inverno a altura solar é mais baixa do que no Verão.



Figura 7 - Esquema representativo dos tipos de seguimento solar. Adaptado de: [20] [21].

O modo de operação ativo implica a alimentação elétrica de motores que deslocam o painel ao longo da trajetória pretendida. O consumo elétrico dos motores e do sistema de controlo representa cerca de 3% da energia total produzida por um sistema de seguimento solar [18]. A maioria dos equipamentos existentes em modo de operação ativo baseia a sua estratégia de controlo numa de duas categorias: *closed-loop* (ciclo fechado) ou *open-loop* (ciclo aberto). Na primeira, diversos sensores induzidos pelo sol (e. g. foto transístor e células solares) funcionam como parâmetros de entrada de um controlador, onde ao estímulo recebido se faz corresponder a posição do sol num exato momento e, consequentemente a ação dos motores de seguimento nessa direção. O mecanismo é automático e dependente do sensor solar. A segunda categoria fundamenta-se numa lógica eletrónica em que o controlador aciona os motores de acordo com um algoritmo matemático que representa um modelo da radiação solar – cada instante do ano corresponde a determinada posição do sol. A associação das duas estratégias, denominada híbrida, minimiza o erro do seguimento solar, na medida em que resolve problemas relacionados com a resposta dos sensores em dias com nuvens, bem como adapta o algoritmo teórico à realidade local, através da correção da posição do sol [22].

Por oposição, o modo de operação passivo não carece de alimentação elétrica para seguir o sol, pois baseia o seu princípio de operação em procedimentos puramente mecânicos. Na maioria dos casos, existe um conjunto de atuadores que interagem entre si, em resposta a estímulos ambientais, no sentido de garantir o equilíbrio térmico dos materiais utilizados: fluídos ou ligas metálicas, orientando o painel na direção do sol. A ausência de eletrônica faz com que os sistemas passivos sejam, geralmente, mais simples e menos dispendiosos do que os ativos. Por outro lado, o custo relativamente à alimentação dos motores não existe. Apesar das mais-valias apresentadas, os sistemas passivos de seguimento não tiveram ainda grande aceitação por parte dos consumidores [3]. A secção 1.3. apresenta alguns exemplos de seguimento solar passivo.

2.3. Estado da Arte

Comparativamente às tecnologias de seguimento solar ativo, amplamente exploradas nos últimos anos, as soluções passivas reveladas pela pesquisa bibliográfica são em menor escala, destacando-se abaixo três tipos distintos de seguimento solar passivo.

Um exemplo de seguimento solar passivo, conhecido como princípio de Zomework, é descrito em [16]. Este consiste no aquecimento diferencial de um fluido (um líquido volátil) contido no interior de dois cilindros interligados entre si – estes são posicionados nas extremidades do painel através de uma estrutura de apoio. Assim, devido à diferença de pressão, induzida pelo aquecimento do sol e pelo sombreamento dos cilindros durante o dia, o fluído desloca-se ao longo do circuito, forçando o painel a mover-se no sentido Este-Oeste. Este termina o ciclo diário orientado para Oeste, retomando a posição inicial na manhã seguinte. Os testes experimentais revelam um incremento da potência elétrica de saída em cerca de 23% em relação a um sistema fixo, para uma amplitude de seguimento entre -20° e 40° .

No domínio das ligas metálicas com memória destaca-se o trabalho desenvolvido por [23], onde se apresenta um seguimento passivo de um eixo cuja amplitude máxima é $140^\circ (\pm 70^\circ)$, com possibilidade de aplicação a um sistema de um eixo horizontal, vertical ou inclinado. O funcionamento rege-se pela deformação diferencial de duas ligas metálicas que atuam entre si, movendo um rotor acoplado à estrutura do painel fotovoltaico, quando existe uma contração ou expansão provocada pelo aquecimento do sol. Qualquer alteração do foco de radiação faz mover o rotor, e consequentemente a estrutura, nessa direção. As ligas metálicas utilizadas, compostas por cobre, zinco e alumínio retomam a forma original, quando reestabelecido o equilíbrio térmico. A precisão deste protótipo é aproximadamente $\pm 5^\circ$.

Por último, e provavelmente a mais relevante invenção relacionada com a presente dissertação, apresenta-se o protótipo de seguimento solar biaxial, capaz de seguir o sol numa amplitude de altura solar de 60° e de azimute de 180° . Este equipamento, desenvolvido pela Universidade de Wisconsin-Madison, nos Estados Unidos da América em 2012, é constituído por uma plataforma (onde deverá ser instalado um painel PV) interligada a diversos atuadores que contraem quando expostos a radiação e relaxam caso contrário. O material constituinte dos atuadores é um nanocompósito com resposta mecânica reversível, formado por cristais líquidos elásticos, que lhe conferem estrutura e flexibilidade; nanotubos de carbono, que convertem a energia dos fotões em energia térmica e aumentam a condutividade térmica; e fibra de poliuretano, que garante robustez mecânica e impede a rutura. Depois de se remover a fonte de luz, as placas atuadoras retomam a sua forma original em poucos segundos [24].

A Figura 8 representa cada um dos exemplos acima descritos.

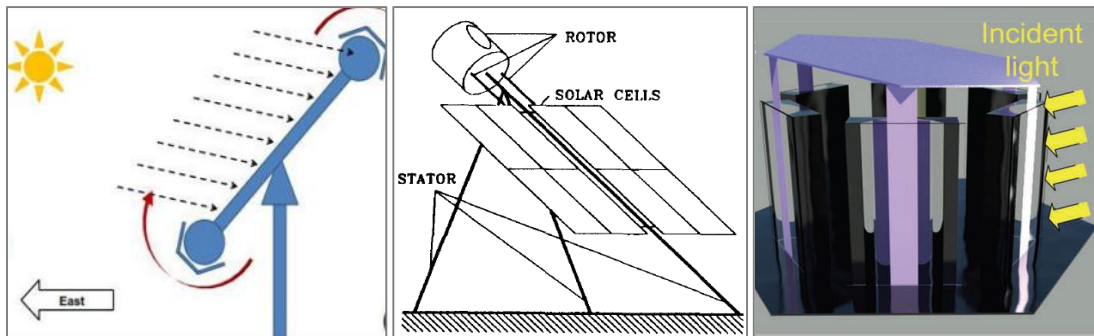


Figura 8 - Sistemas de seguimento solar passivo por diferença de pressão de um fluído (à esquerda); atuadores de ligas metálicas com memória (no centro) e atuadores de nanocompósitos foto-termomecânicos (à direita). Fonte: [16], [23] e [24].

Capítulo 3 - Descrição do Protótipo

Pretende-se neste capítulo fazer uma descrição da patente desenvolvida pela AST, com a referência WO2013042086, explicitando o mecanismo de seguimento passivo proposto, bem como o local de instalação.

3.1. Patente

A ideia consiste em tirar partido da expansão térmica de diferentes materiais expostos a uma fonte de calor - o Sol ou qualquer outra - e, através de um mecanismo de alavancas, multiplicar o deslocamento causado pela variação de volume de certos componentes expostos à fonte de calor ou à sombra. Materiais que possuam boa expansão térmica linear, robustez, resistência ao choque térmico e ductilidade são adequados para converter pequenas variações de temperatura em ações relevantes. Conforme a Figura 9, o sistema divide-se em armação (1), elementos resistivos ao calor (ERC) (2), unidade de transmissão de deslocamento (UTD) (3), plataforma (4) e unidade de amortecimento.

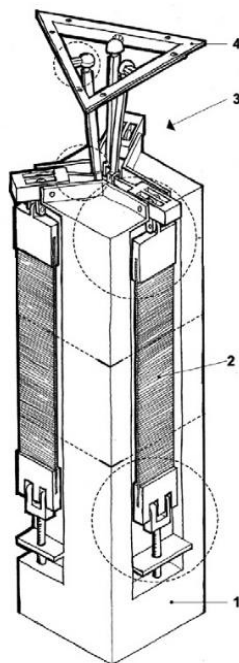


Figura 9 - Esboço do protótipo do SEG SOL. Fonte: [25] e [26]

A armação serve de suporte às restantes estruturas, estando ligada na base aos ERC e no topo à UTD. Dado tratar-se de um estudo no hemisfério Norte, cada uma das placas deverá ser orientada segundo uma das três direções Este, Sul e Oeste, por forma a receber radiação em cada face da armação, dependendo da altura do dia. Assim, devido à posição do sol relativamente ao protótipo, cada barra metálica irá experimentar diferentes níveis de radiação e, consequentemente, existirá um aquecimento diferencial entre cada um dos ERC e a própria armação. Este aquecimento provocará a expansão térmica do material que constitui o ERC e que se encontra fixo à armação através de um tensor com um grau de liberdade, permitindo o ajuste da tensão da barra metálica, e conectado à UTD, em tensão permanente evitando deformação por compressão. A UTD é composta por um sistema de três alavancas, em que os membros são dispostos simetricamente, segundo uma amplitude de 120° entre si (Figura 10). Cada membro é formado por um antebraço e um braço superior, ligados entre si através de uma junta revolvente. Cada braço apresenta, por sua vez, uma vareta de conexão

ligada à plataforma através de uma junta esférica e uma alavanca de primeira classe ligada ao ERC e à armação. No instante em que se dá a expansão térmica da placa, o antebraço e o braço superior correspondentes movimentam-se um em relação ao outro, levando a UTD a encontrar uma nova posição de equilíbrio, posicionando, desta forma, a plataforma na direção fonte de calor. Por outro lado, quando se verifica diminuição da temperatura, o comprimento das placas diminui, aumenta a tensão na barra metálica e a plataforma é induzida a encontrar nova posição de equilíbrio.

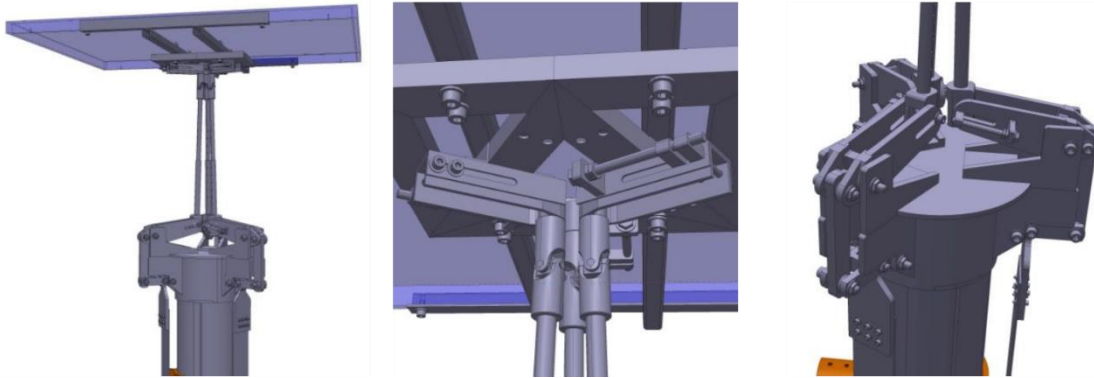


Figura 10 - Perspetiva do sistema de alavancas. Fonte: [27]

O mecanismo acima descrito baseia-se essencialmente no processo térmico de radiação, visto que tanto a condução como a convecção de calor são homogêneas, pelo que, *à priori*, não influenciam a posição de equilíbrio da UTD. Quando uma das barras metálicas está exposta ao fluxo de calor, as restantes estão protegidas pela sombra, criando assim a assimetria no sistema. Os ERC são três elementos de metal com coeficiente de expansão térmica superior a todos os outros elementos da estrutura, apresentam elevada absorvidade e baixa emissividade e devem ser finos o suficiente para minimizar a inércia térmica, aumentando a rapidez de resposta a variações de calor. Contrariamente, a armação deverá apresentar elevada refletividade e emissividade.

Em condições de céu nublado, de vento forte ou período noturno a plataforma deverá assumir uma posição horizontal. No primeiro caso, existe uma distribuição isotrópica de luz solar devido à difusão nas nuvens, o que leva a que não exista uma direção preferencial da radiação; predomina o processo de convecção e cada ERC deverá apresentar temperaturas semelhantes, pelo que o deslocamento será igual. No segundo caso, a convecção domina igualmente em relação aos restantes processos térmicos e a plataforma posiciona-se na orientação do zénite, o que minimiza a resistência ao ar, assegurando a segurança da estrutura.

Realizaram-se testes preliminares no sentido de testar a invenção aqui descrita. Para tal efetuaram-se medições no Verão e no Inverno, em latitude média no hemisfério Norte, utilizando um protótipo com ERC de alumínio revestido com tinta preta.

A não utilização de motores elétricos para movimentação das estruturas do seguimento, de sensores para identificar a direção da fonte de calor e de peças hidráulicas para mover as estruturas fazem parte das características deste protótipo patenteado em Coimbra, a Setembro de 2011.[25]

3.2. Conceitos Mecânicos

A multiplicação da variação de comprimento das placas (da ordem de milímetros) só é possível devido à vantagem mecânica gerada pela alavancagem, ou seja, a proporção entre o braço de esforço e o braço de carga (Princípio dos Momentos de Arquimedes). Elevar cargas pesadas com esforço reduzido implica que o braço de esforço seja muito maior do que o braço de carga, pelo que para tirar

partido dos pequenos deslocamentos será necessário que o braço de carga seja muito maior do que o braço de esforço. Tendo em conta que o comprimento das placas é muito maior do que a sua largura, estas suportam facilmente tesões de tração, contudo não conseguem suportar forças de compressão. A Figura 11 ilustra o funcionamento das alavancas e respetiva rotação dos braços (A, B, C, D) em torno dos pontos de apoio, representados pelos triângulos. A vantagem mecânica resulta, assim, da razão entre ΔL_3 e ΔL_1 – esta pode ser estimada através de semelhança de triângulos e das distâncias entre os pontos de rotação.

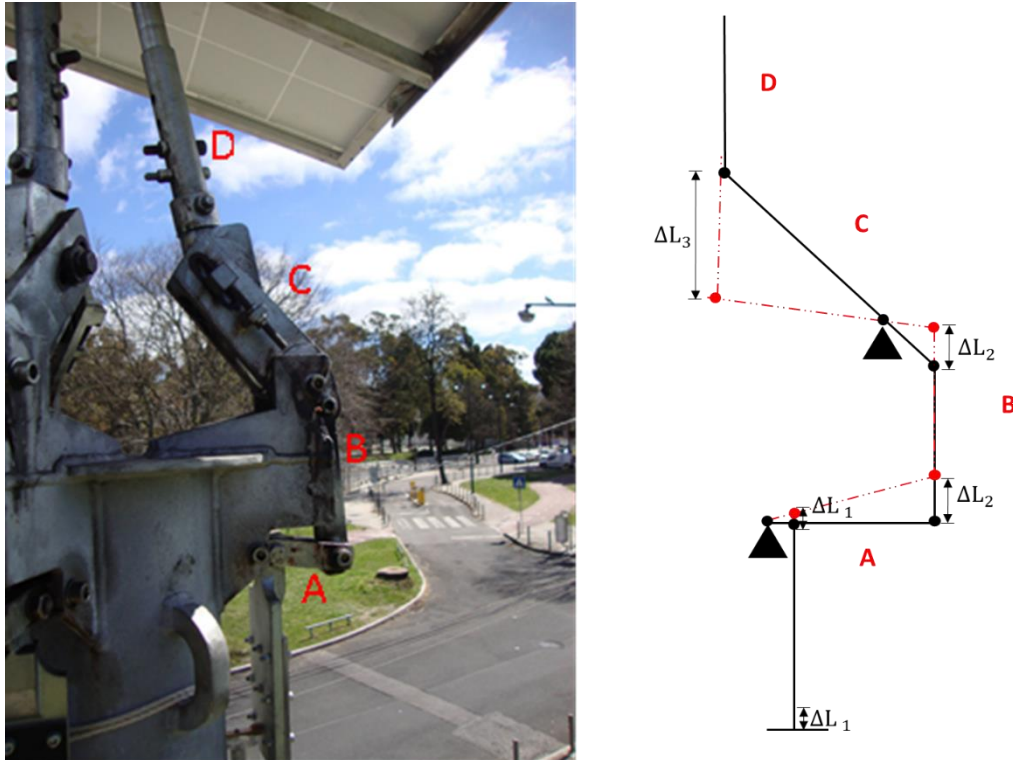


Figura 11 - À esquerda: fotografia do sistema de alavancas orientado a Sul. À direita: esquema do funcionamento das alavancas – o esquema não está à escala, serve apenas para representar o efeito do deslocamento da placa de alumínio, bem como a vantagem mecânica gerada. Adaptado de [27]

O seguimento solar imposto pela expansão térmica das placas resulta da perturbação do equilíbrio mecânico entre o peso do painel fotovoltaico (distribuído pelos três pontos de apoio no painel) e a força de tração total aplicada nas três placas. A força de tração individual de cada placa é irrelevante, até porque varia quando se dá o reajuste das alavancas. Contudo, esta deve ser tal que garanta o equilíbrio dos braços C (de Este, Sul e Oeste) a uma altura do dia em que não exista diferencial de temperatura entre as placas. Quando os braços C estiverem sensivelmente à mesma altura, a meio do curso máximo e mínimo estabelecido pela configuração, a expansão térmica alterará a tensão das placas, fará movimentar as alavancas e, conseqüentemente o painel, no sentido de encontrar um novo ponto de equilíbrio entre o peso e a força de tração. Tendo em conta que a expansão térmica do mastro é uniforme, e tratando-se de aço, menos significativa do que a das placas de alumínio^a, espera-se que a diferença de expansão entre as três placas seja o principal mecanismo responsável pelo seguimento.

^a O coeficiente de expansão térmica (CET) do alumínio é cerca de $23,8 \mu\text{m/m/K}$, entanto o CET do aço é aproximadamente $17,3 \mu\text{m/m/K}$. [27]

3.3. Localização

A escolha do local para instalação do protótipo e da estação de monitorização solar deve ter conta alguns aspetos fundamentais, tais como o acesso ao recurso solar; a proximidade ao operador responsável por assegurar a manutenção da estação e a monitorização do protótipo; e o cumprimento dos requerimentos impostos pelo patrocinador do projeto. Assim, ambos os sistemas foram instalados no Campus Solar da FCUL, de coordenadas 38,76° Norte e 9,16° Oeste – conforme a disposição ilustrada na Figura 12. A localização escolhida para instalação do protótipo teve por base a proximidade à casa de apoio – essencial para a aquisição de dados dos diversos sensores de monitorização; a proximidade ao gradeamento – para montagem do mastro do protótipo através de grua; e a maximização da exposição solar das três placas expansoras, orientadas respetivamente para Este, Sul e Oeste. Optou-se por instalar a estação meteorológica a cerca de 25 metros do protótipo, afastada do gradeamento e junto ao muro do terreno, com o objetivo de proteger os sensores de radiação de possíveis danos externos.

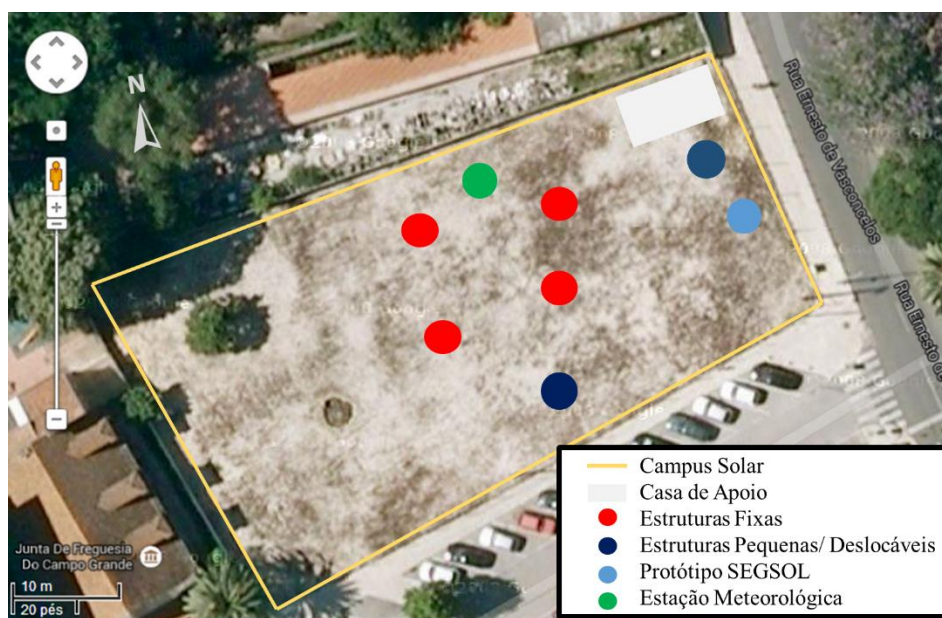


Figura 12 - Esquema representativo da disposição do Campus Solar da FCUL, com destaque para a localização do protótipo do SEGSOL e da estação meteorológica.

Atendendo à localização do Campus, existem obstruções que dificilmente conseguirão ser evitadas, principalmente no período de Inverno, quando a altura solar é mais baixa, e, consequentemente, o efeito do sombreamento será mais evidente. Tendo em conta as limitações acima referidas, o estudo da trajetória do Sol pode evidenciar possíveis problemas relacionados com o sombreamento provocado pelos obstáculos existentes na envolvente, tais como edifícios, árvores, postes e outros sistemas instalados no Campus. A Figura 13 ilustra o efeito causado pelo sombreamento da envolvente no local de instalação da estação meteorológica para os dias referidos (solstício de Verão e solstício de Inverno), ao meio dia solar e ao fim da tarde. Os esquemas foram produzidos no programa *Google Sketchup*, utilizando a ferramenta *shadows*. O local ideal não deverá ter obstruções maiores do que 5° acima da linha do horizonte, contudo obstruções até 10° são aceitáveis, desde que não interfiram com a trajetória do sol segundo [10].

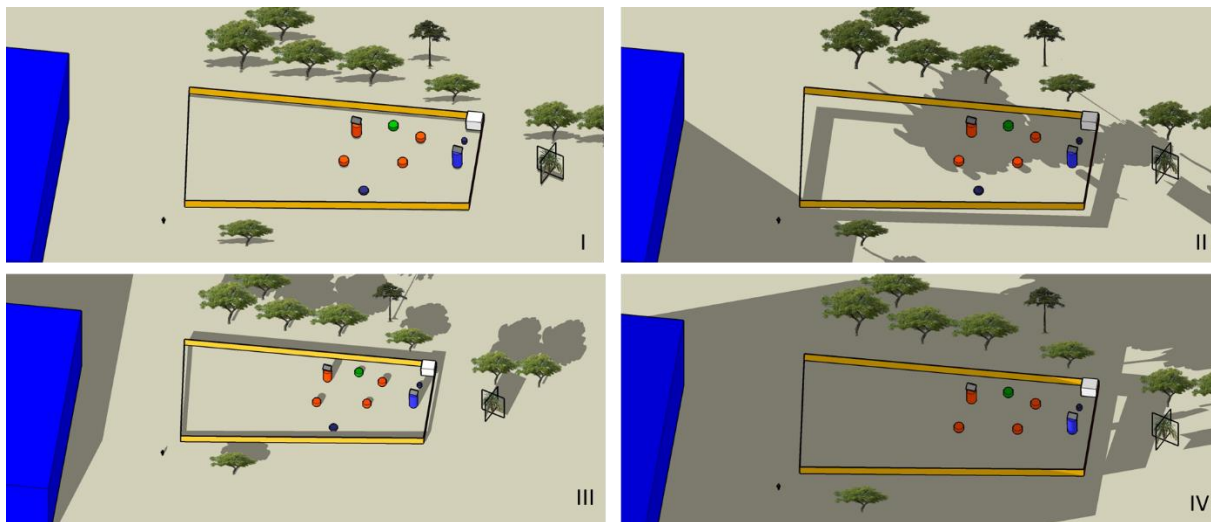


Figura 13 - Sombreamento previsto no Campus Solar para dia 21 de Junho às 12h (I) e às 18h (II); para dia 21 de Dezembro às 12h (III) e às 16h (IV).

O painel fotovoltaico instalado (especificações Tabela 4) alimenta um banco de duas baterias, ligadas em paralelo (tecnologia GEL S 12/60 A), que fornecem energia a uma luminária instalada no protótipo (LED 25 W). A Figura 14 apresenta fotografias do protótipo e os diversos componentes.



Figura 14 - À esquerda: vista a partir de Sul do protótipo; ao centro: vista de Norte do protótipo e da luminária; à direita: vista em pormenor do quadro elétrico.

Capítulo 4 – Metodologia

O presente capítulo apresenta a metodologia adotada para a avaliação do desempenho do protótipo. Esta baseia-se na monitorização do funcionamento do protótipo em ambiente real em comparação com um modelo teórico que prevê a resposta do protótipo às condições ambiente, conforme representado no esquema da Figura 15.

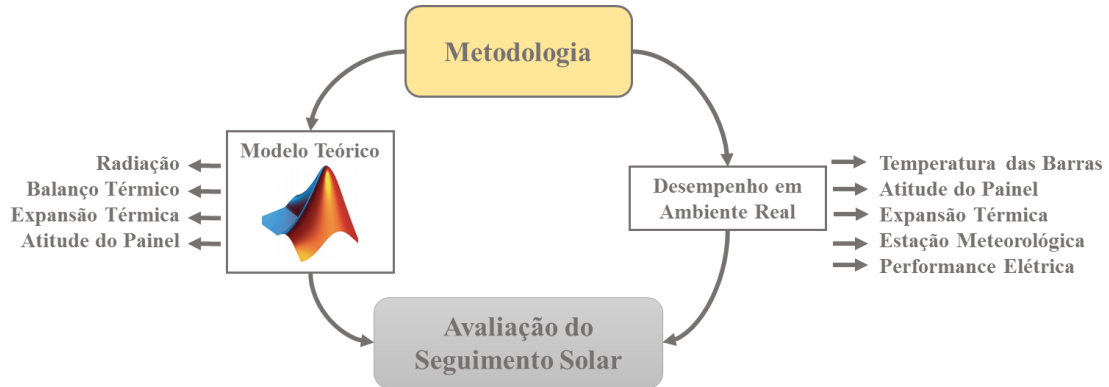


Figura 15 - Esquema ilustrativo da metodologia adotada para avaliação de desempenho do sistema de seguimento solar.

4.1. Modelo Teórico

Pretendeu-se elaborar um modelo teórico no programa Matlab que representasse os fenómenos físicos que induzem o protótipo a seguir a trajetória do sol, conforme descrito na secção 3.1. Para tal há que considerar a radiação solar que chega a cada uma das placas de alumínio orientadas segundo Este, Sul e Oeste; estimar a temperatura das mesmas, através das equações de balanço térmico; prever a expansão térmica de cada placa e, por fim, correlacionar a expansão térmica com a posição do painel fotovoltaico.

▪ Radiação

As equações definidas na secção 0 constituem a base do modelo radiativo utilizado para estimar a irradiância que chega às três placas do protótipo. A Figura 16 ilustra a comparação entre o GHI estimado pelo modelo e o GHI extraído de dados de satélite disponíveis em SoDa para o mesmo local, referentes ao ano de 2004 [28]. As principais diferenças devem-se ao fato de o modelo radiativo admitir uma atmosfera de céu limpo, ao contrário dos dados reais disponíveis. Por outro lado, a discrepância predominante nos meses de Inverno poderá dever-se à aproximação do cálculo de radiação difusa utilizada no modelo. Ainda assim, o perfil anual segue um padrão semelhante, pelo que, à partida, esta deverá ser uma aproximação credível. A média anual da diferença absoluta entre o modelo e os dados SoDa, estimada através da equação (26), é cerca de 33 W/m².

$$\text{Diferença} = |\text{GHI}_{\text{modelo}} - \text{GHI}_{\text{SoDa}}| \quad (26)$$

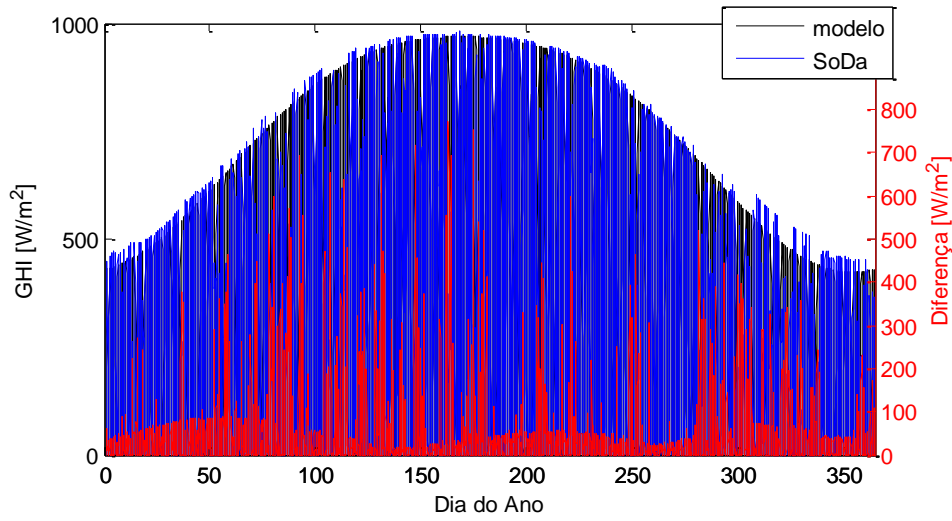


Figura 16 - Comparação entre a irradiância global no plano horizontal estimada através do modelo teórico e a informação extraída de dados de satélite para o mesmo local. O eixo secundário ilustra a diferença absoluta entre ambas.

Assim, considerando as três placas dispostas na vertical com inclinação $\beta=90^\circ$ e azimute $\gamma_{\text{Este}} = -90^\circ$, $\gamma_{\text{Sul}} = 0^\circ$ e $\gamma_{\text{Oeste}} = 90^\circ$, é possível estimar a irradiância que em média chega a cada placa ao longo de um ano típico (Figura 17). A placa orientada a Sul deverá receber mais radiação durante o Inverno, do que durante o Verão, contrariamente a qualquer uma das restantes. À escala intra-anual, o perfil de irradiância da placa orientada a Oeste é semelhante ao da placa virada a Este, apesar da primeira obter o pico de irradiância ao final do dia e da segunda apresentar o seu máximo durante o período da manhã - Figura 18. O perfil da curva de irradiância na placa Sul justifica-se pelo facto de a trajetória do sol no Verão ser mais alta do que no Inverno, aumentando consequentemente o ângulo de incidência (θ_i).

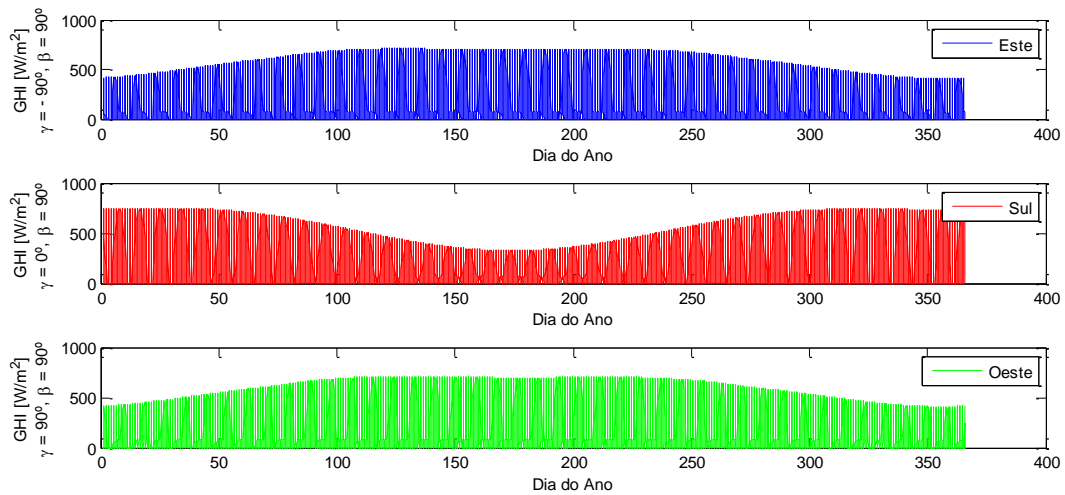


Figura 17 - Estimativa da irradiância global incidente nas placas de alumínio para um ano típico. Cima: placa Este; Centro: placa Sul; Baixo: placa Oeste.

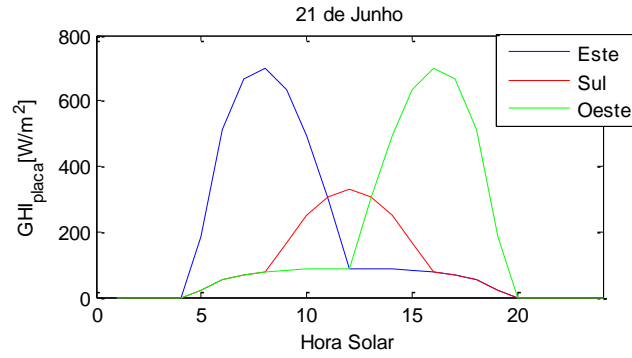


Figura 18 - Estimativa da irradiância incidente nas placas de alumínio para um dia típico de Verão.

▪ Balanço Térmico

As equações abaixo apresentadas, utilizadas para definir o balanço térmico das placas de alumínio, baseiam-se na metodologia desenvolvida por [5] relativa aos processos de transferência de calor.

As trocas de energia com a vizinhança devem obedecer à Primeira Lei da Termodinâmica – a energia total de um sistema é conservada. Pelo que, quer em regime estacionário, quer em regime transiente se deve verificar:

$$\Delta E_{stg} = E_{in} - E_{out} + E_g \quad (27)$$

ΔE_{stg} é a variação de energia acumulada; E_{in} e E_{out} representam a energia que entra e sai, respetivamente num volume de controle e E_g é a energia térmica gerada. Tendo em conta que não existe energia térmica gerada nas placas, a equação (27) pode ser simplificada:

$$\Delta E_{stg} = E_{in} - E_{out} \quad (28)$$

A componente E_{in} corresponde à energia absorvida pelas placas, função da absorvidade do material (α) e da irradiância total incidente em cada uma delas. E_{out} representa o calor cedido pela placa à vizinhança por convecção e por radiação (admitiu-se não existir perdas por condução entre as placas e a estrutura, pois os pontos de contato são reduzidos). Através da aplicação do Método da Capacitância Global é possível resolver problemas em que as condições do sistema não são constantes no tempo, como é o caso da transferência de calor nas placas de alumínio, permitindo estimar o termo ΔE_{stg} . Para tal recorre-se a uma grandeza adimensional, denominada número de Biot (Bi).

$$Bi = \frac{h_c L}{k_{AL}} \quad (29)$$

h_c é o coeficiente convectivo [$W/(m^2.K)$], L é o comprimento característico da placa [m] e k_{AL} é a condutividade térmica do material [$W/(m.K)$].

Para $Bi < 0,1$, o gradiente de temperatura no sólido é desprezável, pelo que a temperatura é uniforme em qualquer ponto do objeto considerado. Neste caso, a principal diferença de temperaturas é entre o objeto e o fluido envolvente – neste caso as placas e o ar.

Assim, reescrevendo a equação (28) é possível estimar a variação da temperatura de cada placa ao longo do tempo $\left(\frac{dT_{placa}}{dt}\right)$:

$$\rho_{AL} V c_{AL} \frac{dT_{placa}}{dt} = \alpha_{Al} GHI_{\beta, \gamma} - h_c (T_{placa} - T_{amb}) - \epsilon_{AL} \sigma (T_{placa}^4 - T_{amb}^4) \quad (30)$$

Onde ρ_{AL} é a massa volúmica do alumínio [Kg/m³]; V é o volume da placa de alumínio [m³]; c_{AL} é o calor específico do alumínio [J/(Kg.K)]; α_{Al} é a absorptividade do alumínio; $GHI_{\beta, \gamma}$ é a irradiância total que chega à placa em [W/m²]; T_{placa} e T_{amb} representam respetivamente a temperatura da placa e a temperatura ambiente [K]; ϵ_{AL} é a emissividade da placa de alumínio revestida e σ é a constante de Stefan-Boltzmann [W/(m².K⁴)]. A Tabela 1 apresenta os valores das constantes utilizadas no modelo teórico.

Tabela 1 - Constantes físicas utilizadas no modelo teórico.

Parâmetro	Unidade de Medida	Valor
h_c	W/(m ² .K)	10 ^b
L	mm	2,3
k_{AL}	W/(m. K)	177
ρ_{AL}	Kg/m ³	2800
V	dm ³	1,4
c_{AL}	J/(Kg.K)	914,8
α_{Al}	-	0,30 ^c
ϵ_{AL}	-	0,92 ^d
σ	W/(m ² . K ⁴)	5,67 . 10 ⁻⁸

A Figura 19 representa a temperatura estimada de cada placa para um dia típico de Primavera, Verão, Outono e Inverno - soluções da equação (30), utilizando um intervalo de tempo de 1 minuto.

^b Pode variar entre 2 e 25 W/(m².K) para convecção natural em gases [5]. Este valor foi otimizado no sentido de aproximar as temperaturas estimadas às temperaturas medidas.

^c Valor aproximado, estimado através da otimização do perfil das curvas de temperatura.

^d Resultado do teste de emissividade efetuado pela AST. Este valor de emissividade é válido para a região do infravermelho.

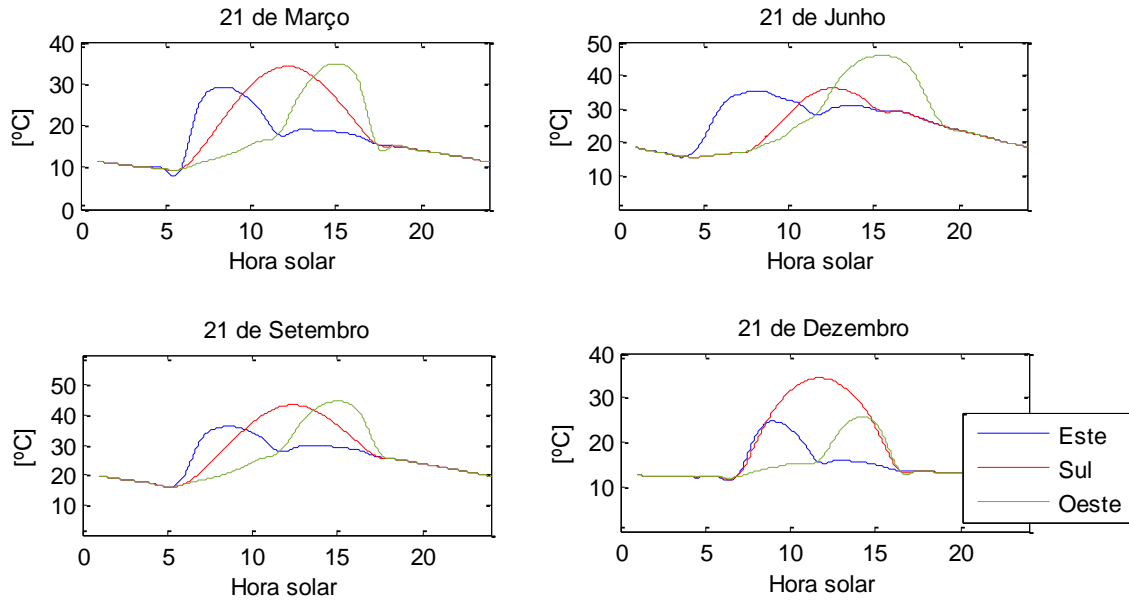


Figura 19 - Estimativa da temperatura das placas para um dia típico de Primavera, Verão, Outono e Inverno, através da aplicação do conceito de balanço térmico num volume de controlo.

▪ Expansão Térmica

Conhecendo a variação da temperatura das placas ao longo do tempo (ΔT_{placa}), bem como a capacidade de expansão térmica do material constituinte – coeficiente de expansão térmico linear (CET) – é possível estimar iterativamente a variação de expansão térmica das placas prevista. Considerando o comprimento das placas, ao início de cada dia, igual a 3,84 metros (L_i); a variação do comprimento da placa entre dois minutos consecutivos (ΔL) é dada por:

$$\Delta L = L_i \text{ CET } \Delta T_{\text{placa}} \quad (31)$$

Onde α toma o valor aproximado de $23,8 \mu\text{m/m/K}$ para o material considerado - Alumínio (ENAW-AlMn1Mg1).

De forma idêntica, representa-se na Figura 20 a estimativa da expansão térmica absoluta de cada placa de alumínio para um dia típico de Primavera, Verão, Outono e Inverno.

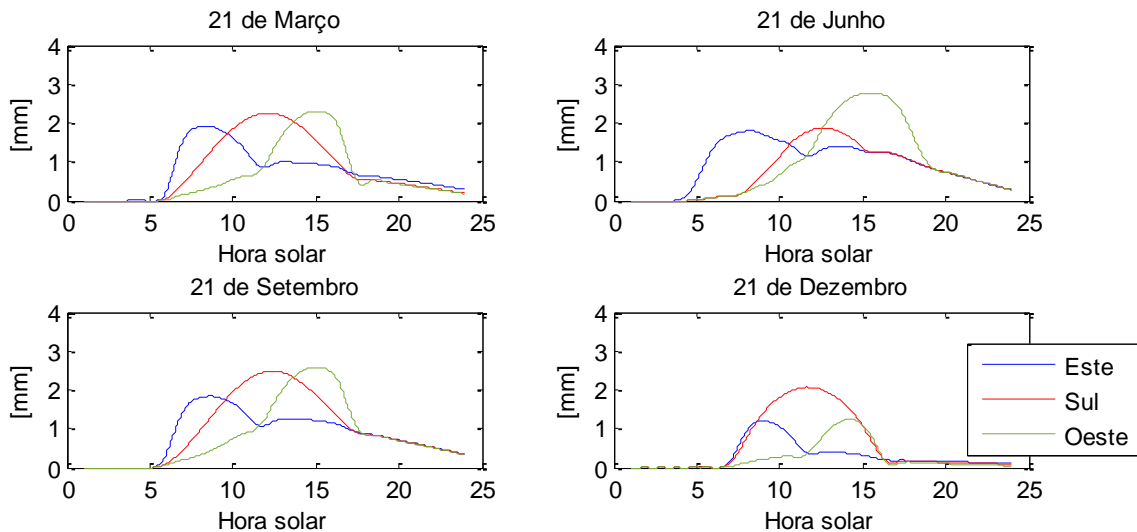


Figura 20 - Estimativa da expansão térmica absoluta das placas de alumínio para um dia típico de Primavera, Verão, Outono e Inverno.

▪ Atitude do Painel

Conforme descrito na secção Conceitos Mecânicos, a atitude do painel fotovoltaico, isto é, a amplitude relativamente aos eixos Norte/Sul e Este/Oeste, depende em cada momento do equilíbrio mecânico entre os três braços das alavancas. Cada braço sofre, por sua vez, a ação conjunta de duas forças principais – a distribuição do peso do painel e a força de tração aplicada à placa correspondente. Assim, idealizando uma situação de equilíbrio perfeito, os três pontos de apoio do painel (ligados a cada um dos braços) deverão definir no espaço um plano horizontal, de equação $z = 0$. Qualquer alteração da força de tração individual de cada placa, provocada pela expansão térmica, fará mover o braço correspondente, alterando, conseqüentemente, o ponto de apoio do painel do lado em questão. Como três pontos não colineares definem a posição de um plano no espaço, sabendo a distância entre os pontos e o centro de massa do painel, assim como a multiplicação do deslocamento nas alavancas - proporcional à expansão térmica - é possível estimar a posição do painel para cada hora do dia. Esta aproximação não tem em conta o efeito combinado da distribuição das forças. A expansão térmica da placa Este, durante o período da manhã, poderá não só mover o ponto de apoio do lado Este, como inclusivamente alterar os outros dois pontos, devido ao reajuste do equilíbrio mecânico. Em termos práticos, espera-se que os três grupos (Este, Sul e Oeste) - constituídos por placa, alavanca e ponto de apoio - trabalhem uns contra os outros.

Admitindo algumas premissas é possível estimar qual a posição do painel ao longo de um dia:

- a) A origem do referencial cartesiano coincide com o centro de massa do painel.
- b) A distância dos pontos de apoio do painel à origem é igual para Este, Sul e Oeste – aproximadamente 10 cm. Na realidade, esta distância pode ser regulada alterando a posição da calha (conforme a Figura 21).
- c) O comprimento dos braços das alavancas é igual nos três grupos – o que em termos práticos também pode ser alterado (ver Figura 21) - produzindo uma multiplicação de cerca de 32 vezes o deslocamento da placa de alumínio^e.

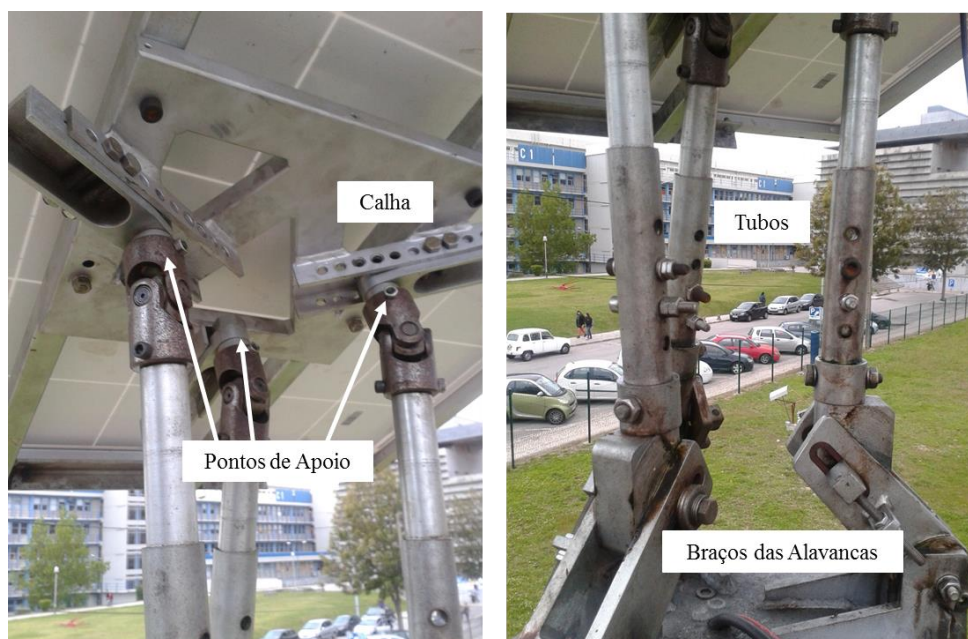


Figura 21 - Fotografias em pormenor do sistema de alavancas, pontos de apoio no painel PV e possíveis ajustes da configuração: calhas, tubos e braços das alavancas.

A Figura 22 apresenta, para um dia típico de Verão, a trajetória prevista do painel instalado no protótipo, considerando a expansão térmica das placas para o dia considerado e as condições atrás

^e Valor estimado a partir do esquema da Figura 11.

estabelecidas. Representa-se, simultaneamente e como referência, o vetor sol calculado através das equações (1) e (2).

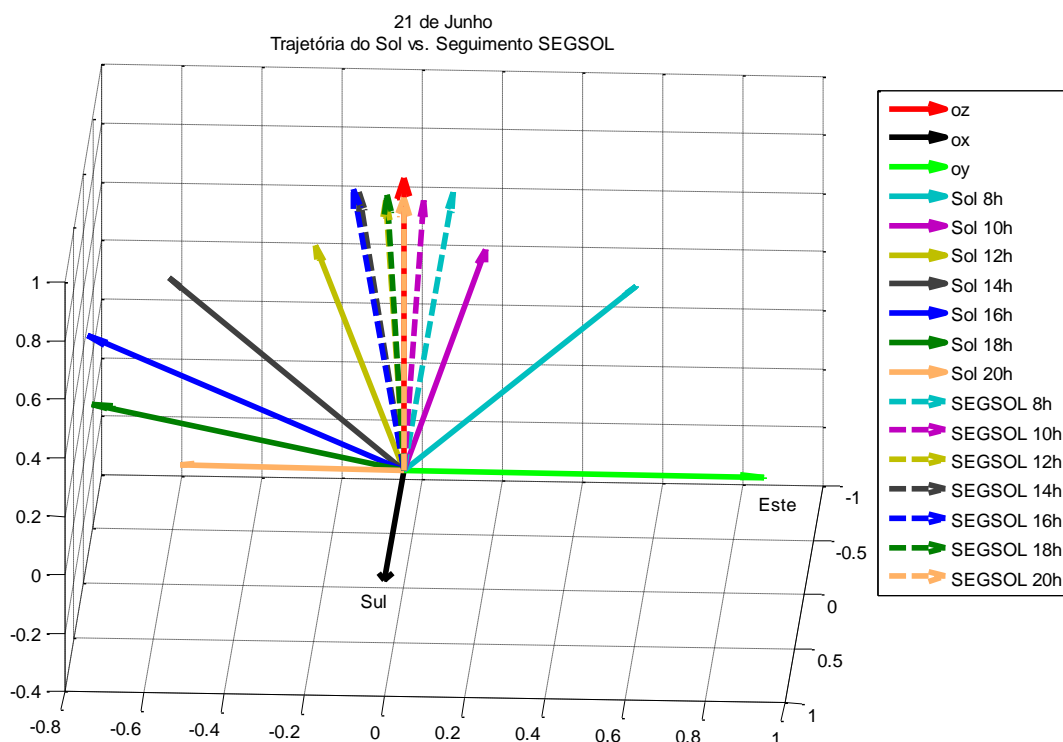


Figura 22 - Comparação entre a trajetória do sol e a atitude prevista do plano do painel para o dia 21 de Junho. Os vetores normais ao Sol (linhas a cheio) e os vetores normais ao painel fotovoltaico instalado no protótipo (linhas a tracejado) são estimados para o intervalo entre as 8h e as 20h (hora solar) com base no modelo radiativo e na expansão térmica das barras de alumínio, respetivamente.

4.2. Desempenho em Ambiente Real

4.2.1. Sistema de Monitorização e Aquisição de Dados

Para avaliar o desempenho do sistema de seguimento solar passivo em ambiente real, procedeu-se à instalação de diversos sensores de monitorização, nomeadamente:

- sensores de temperatura nas placas de alumínio,
- um inclinómetro no painel fotovoltaico;
- três transdutores de posição nas placas orientadas a Este, Sul e Oeste.

O esquema da Figura 23 ilustra a configuração adotada, explicitando quais as grandezas monitorizadas e o local de instalação dos sensores.

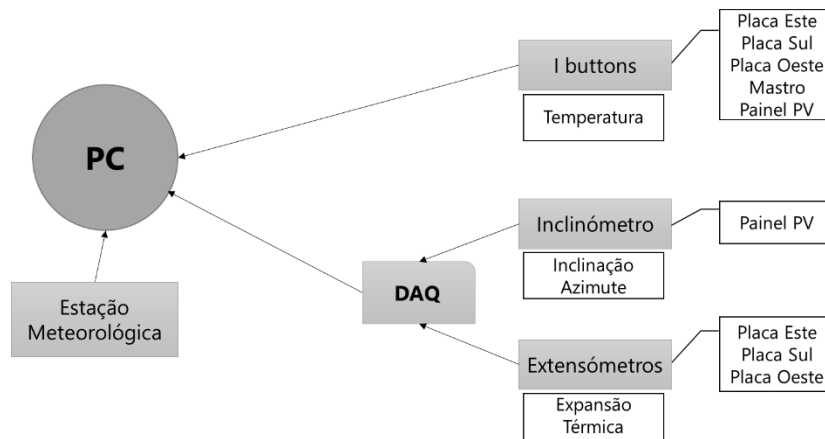


Figura 23 - Esquema representativo da configuração do sistema de monitorização.

A temperatura das placas é monitorizada em três pontos em simultâneo por sensores do tipo Ibutton. Os sensores, colocados na face interior da placa e dispostos no centro e nas extremidades da mesma, conforme a Figura 24, registam a temperatura da superfície interior das placas a cada 5 minutos, armazenando a informação na memória interna do *datalogger* contido no equipamento. As setas assinaladas na imagem representam os três pontos de medição: na base, no meio e no topo de cada placa. O suporte do sensor foi fixo com cola quente e fio de arame. À taxa de aquisição considerada (período de 5 min), os sensores apresentam uma autonomia de cerca de 15 dias, findos os quais os dados devem ser recolhidos através de uma pen-USB e guardados no computador, podendo iniciarse nova aquisição de dados. Este processo pode realizar-se sempre que se justifique. A mais-valia dos sensores de temperatura tipo Ibutton reside na facilidade de instalação, programação e aquisição de dados. De acordo com a *datasheet* [29], a incerteza da medição de temperatura é cerca de $\pm 0,5$ °C.



Figura 24 - Sensores Ibutton dispostos ao longo da face interior das placas de alumínio. As setas assinaladas na imagem representam os três pontos de medição: na base, no centro e no topo de cada placa. O suporte do sensor foi fixo com cola quente e fio de arame, substituído posteriormente por fita-cola.

Para medir a variação da orientação do painel, instalou-se um inclinómetro, cuja tensão de saída varia entre 0,5 V e 4,5 V, correspondendo a uma gama de operação de $\pm 90^\circ$, segundo 2 eixos (ver Figura 25). As variações do campo gravitacional são detetadas e convertidas num sinal analógico [30].

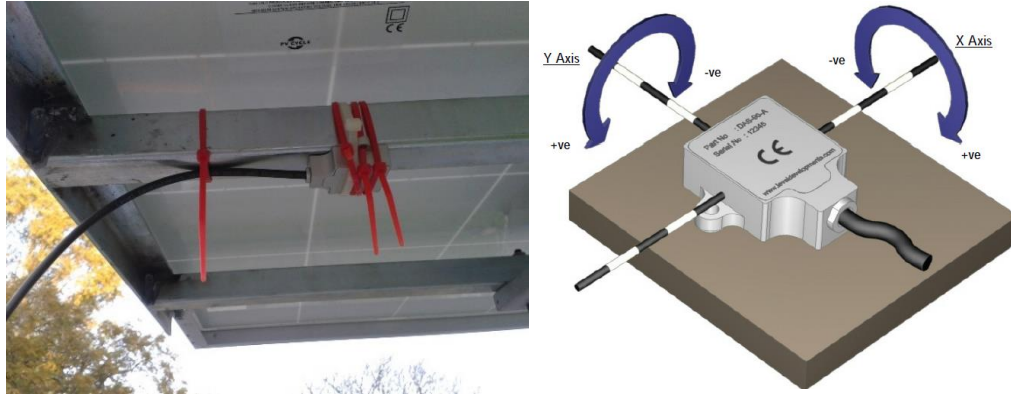


Figura 25 - À esquerda: fotografia do inclinómetro instalado por baixo do painel fotovoltaico; fixo com braçadeiras convencionais à estrutura de ligação entre o painel e o sistema de alavancas. À direita: esquema representativo do funcionamento do sensor e medição da inclinação segundo os dois eixos.

A posição do painel segundo os dois eixos – ângulo formado entre o eixo Norte/Sul e o plano do painel (\angle NS) e ângulo formado entre o eixo Este/Oeste e o plano do painel (\angle EO) – é convertida a partir do *output* recorrendo à seguinte expressão:

$$\text{Angle} = \sin^{-1} \left(\frac{V_{\text{out}} - V_{\text{offset}}}{\text{Sensitivity}} \right) \quad (32)$$

onde V_{out} corresponde à tensão medida pelo sensor, V_{offset} corresponde à tensão de 2,5 V medida pelo sensor quando este está na horizontal (0°), *Sensitivity* é constante e aproximadamente 2 V/g para o sensor em questão.

Através de relações trigonométricas, as amplitudes medidas em cada eixo podem ainda ser escritas em termos de inclinação e ângulo azimutal através das equações (33) e (34), facilitando a comparação com a posição do sol:

$$\beta_{\text{painel}} = \sin^{-1}(-\cos(\angle \text{NS})) \quad (33)$$

$$\phi_{\text{painel}} = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\angle \text{EO}) \cos(\angle \text{NS}) / \cos(\angle \text{EO})}{\sin(\angle \text{NS})} \right] \quad (34)$$

A posição do painel fotovoltaico é adquirida de 1 em 1 minuto através de um DAQ (*Data Acquisition*) *National Instruments* USB-6008, ligado a um PC - Figura 26.



Figura 26 - DAQ *National Instruments* e respetivas ligações elétricas aos sensores e ao PC. O aparelho está instalado na casa de apoio, localizada no Campus Solar.

De acordo com os testes preliminares descritos na patente do protótipo, a expansão térmica prevista das placas de alumínio deverá ser da ordem dos milímetros, podendo ser medida por transdutores de posição do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (abaixo denominados de extensómetros), instalados entre as placas e o mastro, conforme ilustrado na Figura 27. De acordo com a geometria e as características dos materiais constituintes, espera-se que a expansão térmica do mastro seja inferior à das placas. Assim, atendendo à disposição dos sensores, estes medem a diferença de expansão entre as duas estruturas (mastro e placas); o veio dos extensómetros acompanha o movimento de expansão ou compressão das placas.

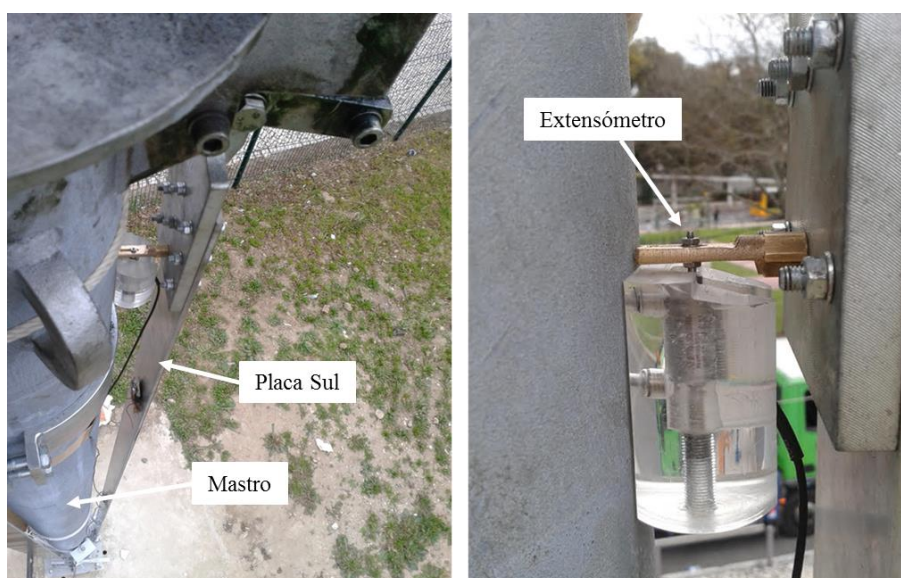


Figura 27 - Extensómetro instalado entre a placa Sul e o mastro de suporte do protótipo SEGSQL. À esquerda: vista de cima da placa Sul. À direita: vista em pormenor das peças de suporte do extensómetro. O sensor encontra-se no interior de uma peça de acrílico (ligada ao mastro por dois parafusos) e preso a uma peça de latão (enroscada na peça de ligação entre a placa Sul e a alavanca correspondente). Instalação idêntica foi aplicada nas placas Este e Oeste.

O output analógico dos extensómetros é adquirido pelo DAQ, através da diferença de potencial induzida pelo deslocamento do veio do sensor. Esta é posteriormente convertida em variação de posição, isto é, uma medida indireta da diferença de expansão térmica mastro – placa, através da curva de calibração de cada sensor (Figura 28).

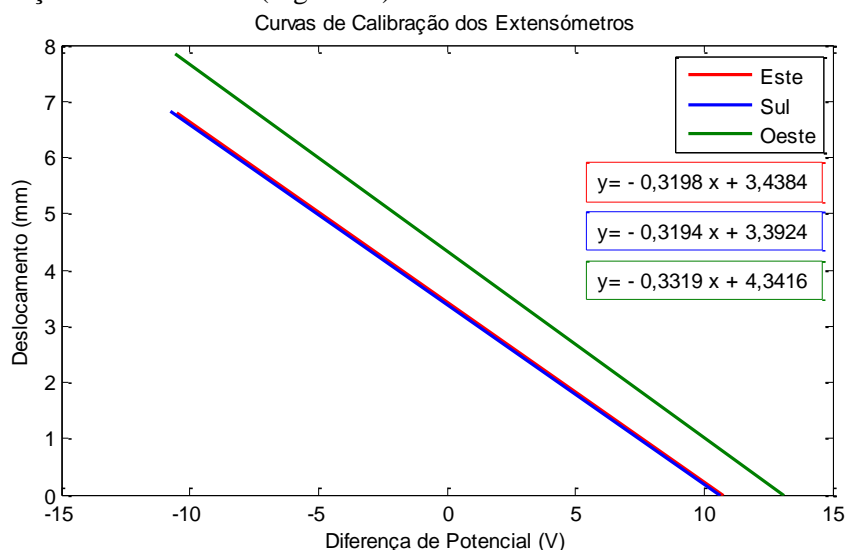


Figura 28 - Curvas de calibração dos extensómetros.

4.2.2. Estação Meteorológica

Pretende-se que a estação meteorológica instalada no Campus Solar da FCUL caracterize as condições ambiente e de operação dos sistemas aí instalados, nomeadamente do protótipo do SEGSQL. Esta entrou em operação no início do mês de Janeiro de 2015, encontrando-se, até à data, a adquirir dados de vento, radiação, temperatura e pressão atmosférica.

Os sensores meteorológicos e de avaliação solar, abaixo indicados, foram adquiridos à *EKO Instruments*. O tripé tem como função suportar o seguidor solar, bem como os *kits* de fixação e o braço lateral que serve de apoio à instalação dos equipamentos de medida, tais como piranómetros (MS-802), pireliómetro (MS-56), conjunto de sombreamento e sensor meteorológico (WS-500). A Figura 29 ilustra a disposição dos vários equipamentos.

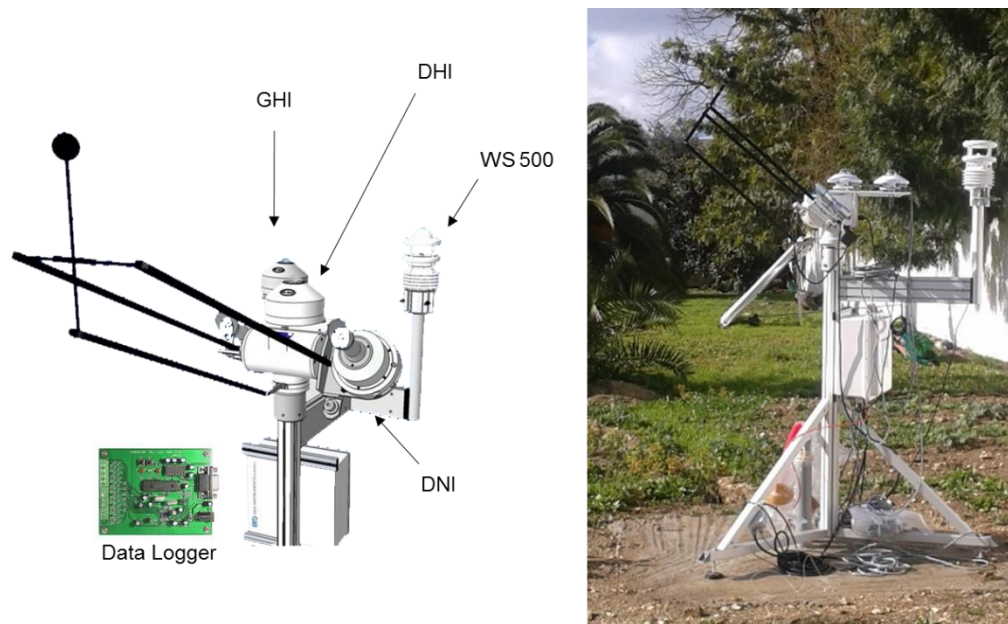


Figura 29 - Esquema representativo da configuração experimental da estação meteorológica instalada no Campus da FCUL (à esquerda) e fotografia (à direita).

O seguidor solar segue o caminho mais provável do sol, calculando a sua posição a cada instante, através de um seguimento automático. Para além do algoritmo programado, a trajetória do sol é corrigida através de um sensor solar. O pireliómetro, acoplado ao seguidor, mede exclusivamente a radiação direta no plano normal aos raios solares (DNI).

O piranómetro instalado no topo do tripé mede a radiação global incidente no plano horizontal (GHI). O segundo piranómetro é sombreado por uma esfera de forma a medir a radiação difusa que chega ao plano por unidade de área (DHI). Ambos os piranómetros são classificados como *Secondary Standard*, segundo a norma internacional ISO9060 e funcionam de acordo com o princípio da termopilha: gera-se uma pequena diferença de potencial proporcional à irradiância absorvida pelo sensor. A estação está ainda preparada para a instalação de um terceiro piranómetro capaz de medir a irradiância num plano pretendido - *Plane of Array* (POA). A existência de um divisor de sinal permite conectar o terceiro piranómetro a outro equipamento, como por exemplo um traçador de curvas IV. A escolha da tecnologia do tipo termopilha reside na maior amplitude da resposta espectral comparativamente a uma célula de referência; o intervalo espectral de uma célula de silício convencional varia entre os 300 nm e os 1100 nm, enquanto para um piranómetro o intervalo espectral varia entre 300 nm e 2800 nm, aproximadamente [31].

Este sistema permite avaliar o recurso solar disponível no local de instalação e de estudo do protótipo, bem como possíveis sombreamentos resultantes da envolvente. Apresentam-se na Tabela 2 as principais especificações dos sensores de radiação solar.

Tabela 2 - Principais especificações dos sensores de radiação.

Equipamento	Parâmetro	Unidade de Medida	Especificações	
Piranómetro	GHI e DHI	W/m ²	Intervalo Espectral	285 a 2800 nm
			Intervalo Irradiância	0 a 1400 W/m ²
			Campo de Visão	180°
			Incerteza	0,66 %
Pireliómetro	DNI	W/m ²	Intervalo Espectral	200 a 4000 nm
			Intervalo Irradiância	0 a 2000 W/m ²
			Campo de Visão	± 2,5°
			Incerteza	0,69 %

A caracterização das condições ambiente é completada pelo sensor meteorológico, através da medição de temperatura ambiente, humidade relativa, pressão atmosférica e velocidade e direção do vento – as especificações são descritas na Tabela 3. O WS 500 foi montado num poste com cerca de 4 metros de altura de forma a minimizar a influência da envolvente, particularmente relevante nos dados de vento.

Tabela 3 - Principais especificações dos sensores instalados no WS 500.

Parâmetro	Unidade de Medida	Princípio de Operação	Especificações	
Temperatura	°C	NTC	Intervalo	-50 a 60 °C
			Incerteza	± 0,2 °C (-20 a 50 °C)
Humidade Relativa	%	Capacitivo	Intervalo	0 a 100% HR
			Incerteza	± 2% HR
Pressão Atmosférica	hPa	MEMS Capacitivo	Intervalo	300 a 1200 hPa
			Incerteza	± 1,5 hPa
Direção do Vento	°	Ultrassónico	Intervalo	0 a 359,9°
			Incerteza	± 3°
Velocidade do Vento	m/s	Ultrassónico	Intervalo	0 a 60m/s
			Incerteza	± 0,3 m/s

Os dados são recolhidos em contínuo, armazenados num *datalogger Campbell* e, por fim, enviados para um computador via *Ethernet*. O *data logger* adquire, por defeito, dados de radiação e meteorológicos a cada 5 segundos e a partir dessas medições calcula valores médios, máximos e mínimos de cada uma das grandezas, armazenando-os na memória interna a cada 10 minutos. A rotina de aquisição de dados é definida pelo utilizador através do *software Loggernet* – os dados são adquiridos de minuto em minuto. Para além da configuração da aquisição de dados, o programa permite aferir em tempo real a medição das diferentes grandezas, conforme ilustrado na Figura 30.

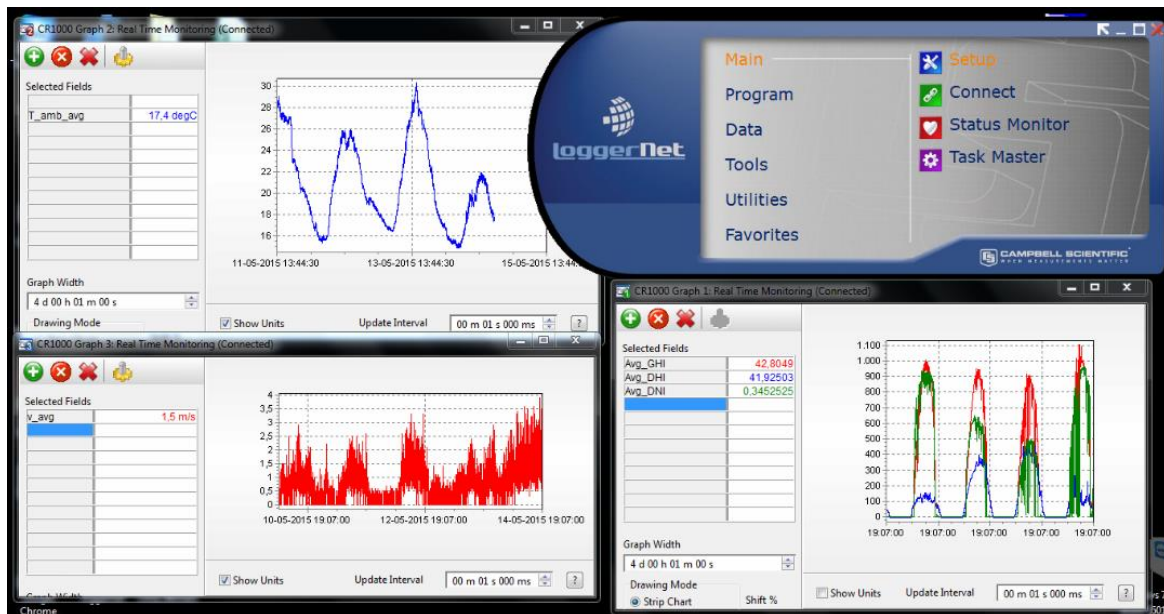


Figura 30 - Printscreen do programa de aquisição de dados *LoggerNet*. Em cima à esquerda: temperatura ambiente; em cima à direita: painel de controlo do programa; em baixo à esquerda: velocidade média do vento; em baixo à direita: irradiância global, direta e difusa.

4.2.3. Desempenho Elétrico

A avaliação do desempenho elétrico do sistema de seguimento é completada através da medição da potência fotovoltaica. Idealmente, o sistema SEGSQL deveria ser comparado com um sistema PV com seguimento biaxial ativo. Devido à ausência de um sistema desta natureza, totalmente operacional, optou-se por fazer a comparação com um painel fixo, instalado segundo uma inclinação de 34° e orientado a Sul ($\gamma = 0^\circ$), sob as mesmas condições de operação – especificações dos módulos na Tabela 4. Para traçar as curvas IV dos dois módulos em simultâneo, recorreu-se a um traçador de curvas IV (MP 160), acoplado a um seletor de módulos (MI 520), ambos adquiridos à *EKO Instruments* (ver Figura 31). O MP 160 traça a curva característica de cada módulo fazendo variar a carga eletronicamente; este controla ainda o funcionamento do seletor MI 520, permitindo medir as curvas IV de vários módulos (no máximo 12) de forma sequencial, com um intervalo tempo de escassos segundos. Conforme recomendação do manual de utilização e, de forma a evitar a queda de tensão nos cabos, utilizou-se o método dos 4 pontos. Ligou-se os módulos ao seletor através de 4 terminais, 2 para medir tensão e 2 para injetar corrente. Embora o traçador esteja preparado para ligação de um piranómetro e de termopares, capazes de registar em simultâneo a irradiância e a temperatura das células, efetuando automaticamente a conversão para as condições STC, tais instrumentos não foram conectados ao traçador por razões logísticas. O MP 160 e o MI 520 foram instalados na casa de apoio para proteção contra as condições ambiente, pelo que tanto o piranómetro como os termopares não tinham comprimento de cabo suficiente para serem instalados no protótipo e conectados ao traçador. Em alternativa, utilizaram-se os dados de radiação adquiridos em contínuo pela estação meteorológica e instalaram-se sensores Ibutton na parte de trás dos módulos. Ao longo de vários dias de campanha, traçaram-se as curvas IV de hora em hora, entre as 7h e as 20h.

Tabela 4 - Características elétricas dos módulos fotovoltaicos nas condições STC - especificações recolhidas das *datasheets* do módulo MPrime, fornecido pela Martifer e instalado no protótipo [32] e do módulo fixo Sanyo, instalado no Campus Solar [33].

		Protótipo SEG SOL	Fixo
Potência Máxima (Wp)	P_{MAX}	150	210
Tolerância de Potência	P_{NOM}	$P_{NOM} - 0; P_{NOM} + 4,99 W$	+10% ... -5%
Corrente MPP (A)	I_{MPP}	8,32	5,09
Tensão MPP (V)	V_{MPP}	18,06	41,3
Tensão de Circuito Aberto (V)	V_{OC}	22,67	50,9
Corrente de Curto Circuito (A)	I_{SC}	8,39	5,57
Eficiência (%)	η	15,2	16,7
Coefficiente de Temperatura de Potência (%/°C)	γ	-0,45	-0,30
Coefficiente de Temperatura de Tensão (%/°C)	β	-0,351	-0,252
Coefficiente de Temperatura de Corrente (%/°C)	α	+0,031	+0,030
Área do Módulo (m ²)	A	0,99	1,26
Número de Células	-	36	72
Tecnologia	-	Multicristalino	Monocristalino



Figura 31 - Módulo fixo utilizado nos testes experimentais (à esquerda); traçador de curvas IV e seletor de módulos e respetivas ligações elétricas (ao centro e à direita).

Capítulo 5 – Resultados

Os resultados apresentados neste capítulo resultam da validação dos dados da estação meteorológica e da monitorização do protótipo em ambiente real, durante o período de tempo compreendido entre Fevereiro e Junho de 2015.

5.1. Qualidade dos dados da Estação Meteorológica

A medição de radiação solar ao nível do solo, baseada nas medidas efetuadas por piranómetros e pireliómetros, acarretam inúmeros erros relacionados com a resposta dos sensores: sensibilidade, estabilidade, tempo de resposta, efeito do cosseno, linearidade, resposta de temperatura e resposta espectral são apenas alguns deles. Tendo em conta tratam-se de sensores do tipo termopilha, a conjugação das incertezas reflete o efeito da absorção radiativa na conversão de diferenças de temperatura, em diferença de potencial e, posteriormente, em irradiância. Entende-se por sensibilidade a razão entre a diferença de potencial medida pelo sensor e o valor correspondente de irradiância e por estabilidade, a percentagem de mudança da sensibilidade do sensor ao longo do tempo. O efeito do cosseno, particularmente relevante, deve-se à dependência entre a absorvidade do sensor e o ângulo de incidência da radiação solar medida pelo equipamento; quanto maior a amplitude do ângulo, nomeadamente ao nascer e ao pôr-do-sol, maior a fonte de erro associada. Outros fatores poderão afetar as medições, tais como defeitos na cúpula e na janela do piranómetro e do pireliómetro, respetivamente; reflexões internas; nivelamento incorreto e humidade no interior dos instrumentos. A prevenção de erros sistemáticos, decorrentes da exposição a agentes externos e de funcionamento dos sensores pode ser efetuada através de inspeção, manutenção e calibração periódica, a que se chama controlo técnico. [34]

Paralelamente, é importante que haja um controlo de qualidade dos dados de forma a garantir, por um lado, a plausibilidade dos mesmos e, por outro, detetar problemas não evidentes à partida, através de comparação com os limites físicos.

A irradiância direta no plano normal e a irradiância global no plano horizontal (ambas extraterrestres), calculadas para cada dia do ano, através das equações (6) e (9) podem ser comparadas com medições reais da estação meteorológica (DNI e GHI), conforme ilustrado na Figura 32 para a segunda metade do mês de Janeiro. Os valores extraterrestres (DNI_0 e GHI_0) representam, assim, os limites teóricos de irradiância no plano normal e no plano horizontal para cada dia.

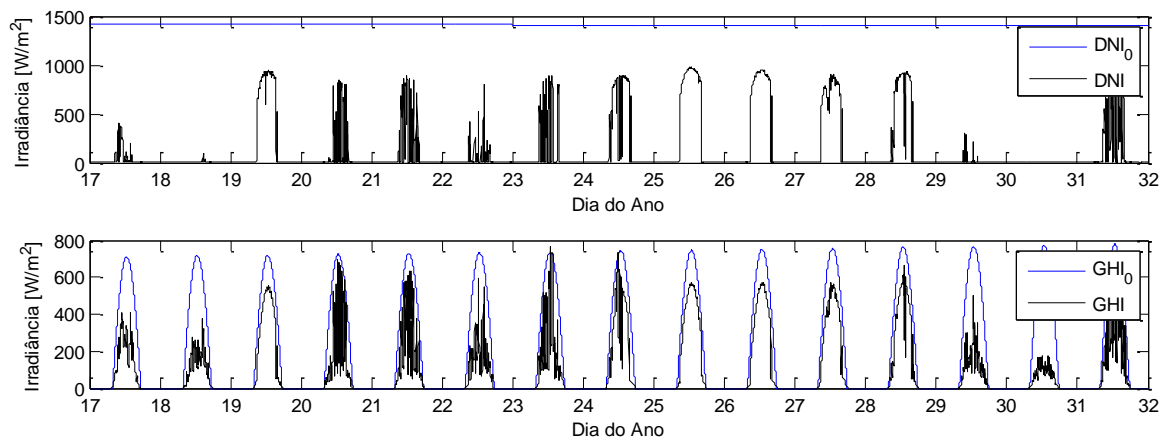


Figura 32 - Comparação entre a irradiância extraterrestre calculada e a irradiância medida pela estação meteorológica, no plano normal (em cima) e no plano horizontal (em baixo). Intervalo: 17/01/2015 a 01/02/2015.

A análise em detalhe de um dia aleatório permite identificar problemas relacionados quer com o efeito do cosseno, quer com um efeito conhecido por *cloud enhancement* – efeito resultante da dispersão de radiação pelas nuvens diretamente no sensor, originando, por instantes, valores de irradiância medidos superiores aos valores teóricos extraterrestres - Figura 33.

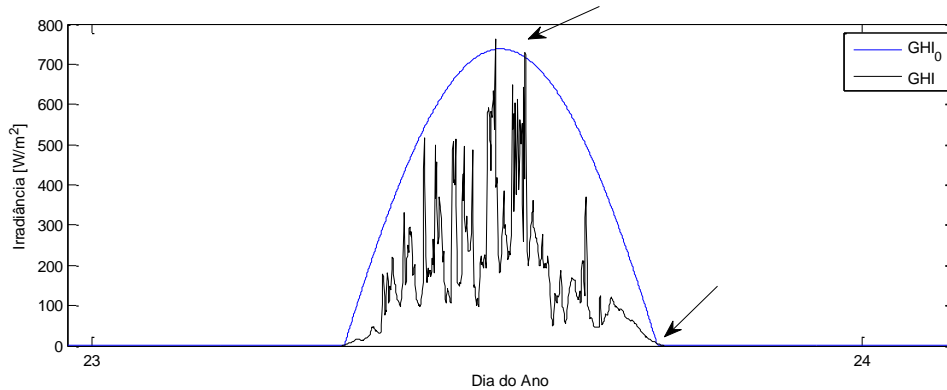


Figura 33 - Vista em pormenor da Figura 32, com identificação de períodos do dia em que a irradiância medida é superior à irradiância extraterrestre. As setas identificam o efeito do cosseno e a reflexão das nuvens para um dia do mês de Janeiro. Intervalo: 23/01/2015 a 24/01/2015.

Apresenta-se na Figura 34 a variação do GHI medido pela estação meteorológica em comparação com o GHI de fecho, calculado pelo somatório da componente direta da radiação no plano horizontal com a componente difusa medida no mesmo plano, dados referentes à segunda quinzena de Janeiro.

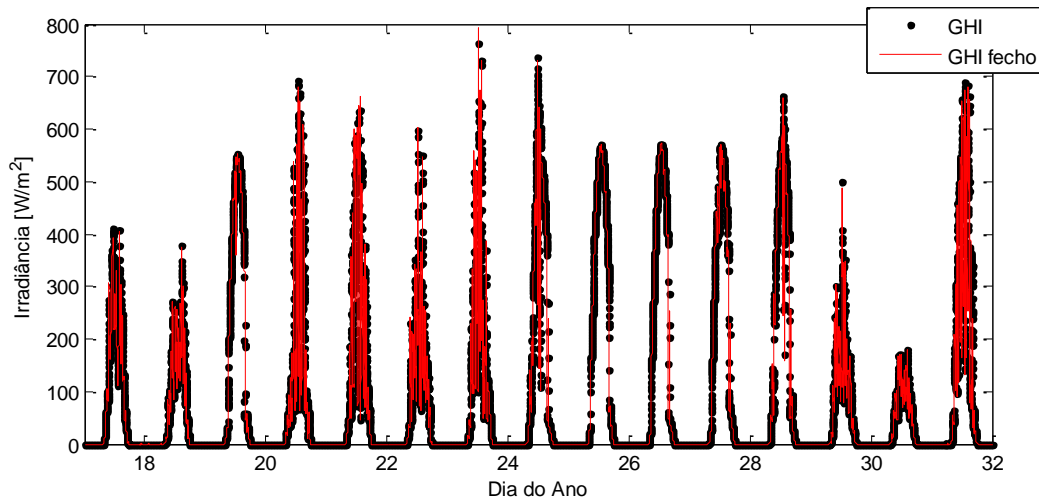


Figura 34 - Comparação entre a irradiância global no plano horizontal medida pela estação meteorológica e calculada pelo somatório da componente direta e difusa. Intervalo: 17/01/2015 a 01/02/2015.

A comparação das séries temporais de GHI de fecho e GHI permite avaliar qualitativamente as medições das componentes direta, difusa e global. Segundo [10], se a diferença entre os dois valores for $\pm 3\%$, é muito provável que as três medições estejam corretas. A diferença é calculada através de:

$$\text{Dif} [\%] = \left| \frac{\text{GHI} - \text{GHI}_{\text{fecho}}}{(\text{GHI} + \text{GHI}_{\text{fecho}})/2} \right| \times 100 \quad (35)$$

Considerando o intervalo de tempo compreendido entre 17 de Janeiro e 21 de Abril de 2015, obtém-se um valor médio da diferença entre GHI fecho e GHI medido de cerca de 2,85% (período entre as 8h e as 17h) e de cerca de 6,45% (considerando todas as horas do dia). A Figura 35 ilustra a diferença

média horária para o mesmo intervalo de tempo. Esta é particularmente relevante no início e no final do dia, períodos em que o efeito do cosseno é preponderante, pois o ângulo de incidência é superior, aumentando a probabilidade de reflexões internas nas cúpulas dos piranômetros.

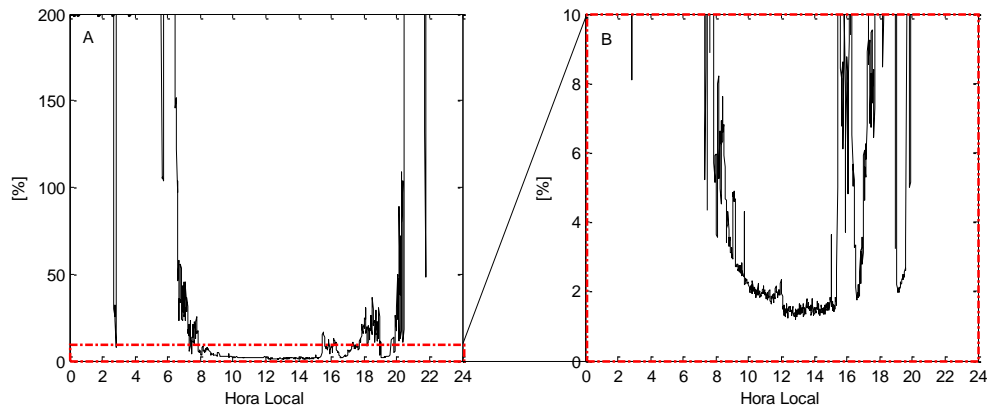


Figura 35 - A: Diferença média horária entre GHI de fecho e GHI medido, evidência do efeito do cosseno. B: Aproximação no eixo das ordenadas (diferença média horária). Intervalo: 17/01/2015 a 21/04/2015.

Um método bastante utilizado para controlo de qualidade de dados consiste na normalização da irradiância pelos valores extraterrestres da componente respetiva. Este permite a análise de uma elevada quantidade de informação, agrupando-a entre si de forma a facilitar a identificação de possíveis *outliers* (pontos fora da mancha principal de dados). Os coeficientes resultantes da normalização denominam-se *clearness index* (k_t) e *beam clearness index* (k_b) e calculam-se através de:

$$k_t = \frac{GHI}{GHI_0} \quad (36)$$

$$k_b = \frac{DNI}{DNI_0} \quad (37)$$

Aplicou-se um filtro no sentido de eliminar os valores de k_t sem sentido físico relevante: valores muito superiores à unidade, correspondentes aos períodos do final do dia, em que GHI_0 é aproximadamente zero e GHI medido é superior, pelo que o quociente resultante é várias ordens de grandeza maior. Assim, se $GHI_0 \leq 20 \text{ W/m}^2$ e $GHI > GHI_0$, então $k_t = \text{NaN}$.

A Figura 36 representa, à esquerda, a relação entre a fração difusa (quociente da irradiância difusa pela global no plano horizontal, medidas pela estação meteorológica) e o k_t e, à direita, k_b em função de k_t . Os dados, de minuto em minuto, foram agrupados por mês, de forma a facilitar a interpretação gráfica. Nos gráficos do lado esquerdo, os pontos do lado inferior esquerdo representam dias de céu limpo, pelo que a fração difusa é baixa. Em dias encobertos, quando o DNI é praticamente nulo, toda a irradiância é difusa, pelo que DHI é igual a GHI, a fração difusa aproxima-se de 1. De notar que valores de k_t maiores do que 1 referem-se a períodos onde se verifica *cloud enhancement*. Nos gráficos à direita, verifica-se que k_b não ultrapassa a unidade para qualquer dos meses considerados, o que seria expectável tendo em conta o limite teórico extraterrestre, conforme ilustrado na Figura 32. Por outro lado quanto menor a massa de ar, menor o percurso do DNI, menor a probabilidade de dispersão, maior poderá ser k_b . Assim, locais de maior altitude deverão ter k_b mais elevados. Uma elevada dispersão das manchas de dados, ou existência de muitos pontos fora do grupo principal poderão ser indicadores de problemas relacionados com as medições de radiação solar.

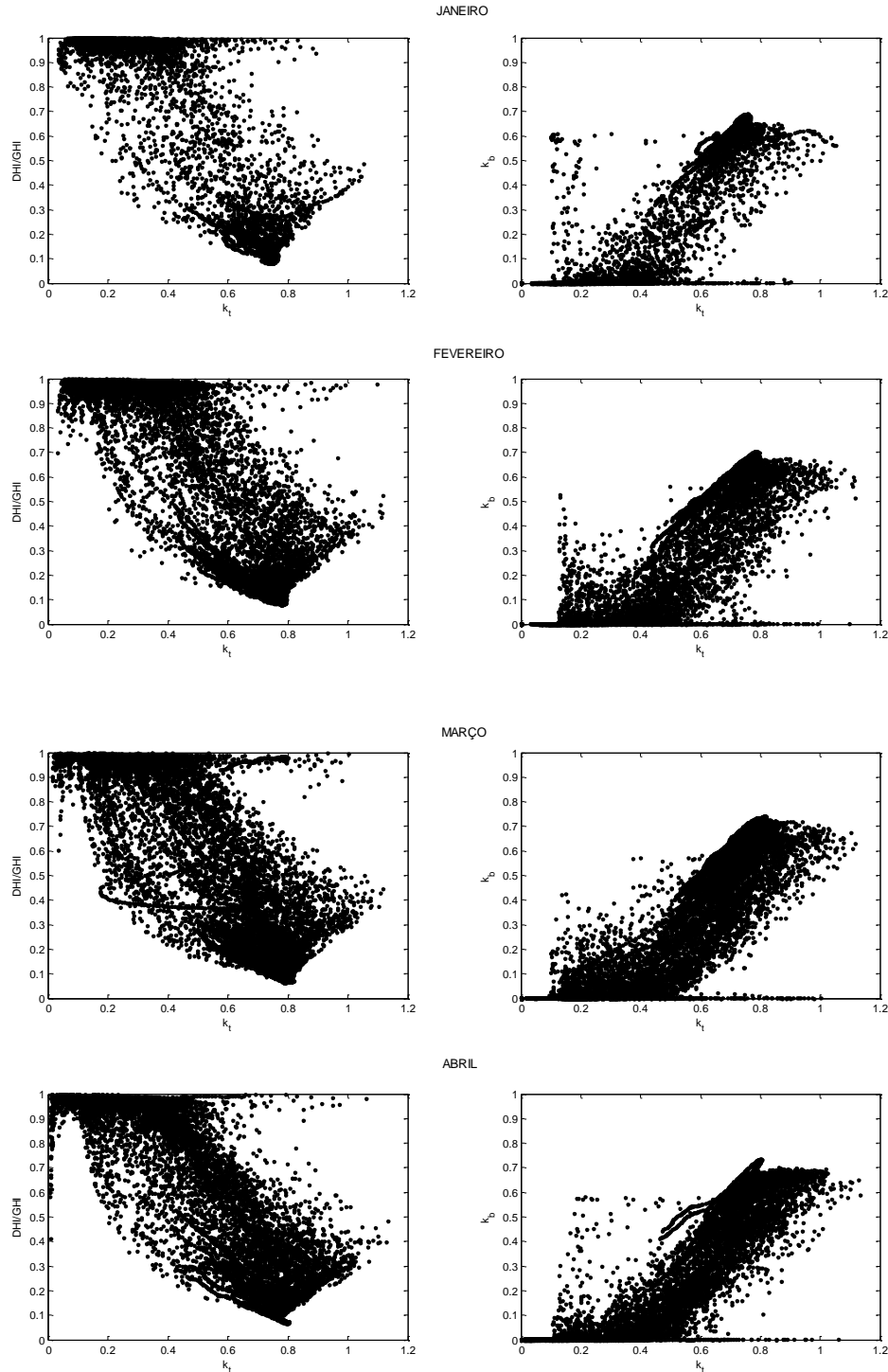


Figura 36 - Controle de qualidade dos dados de radiação solar de minuto em minuto. Fração difusa em função de k_t (à esquerda) e k_b em função de k_t (à direita). Intervalo: 17/01/2015 a 21/04/2015.

Quanto maior o intervalo entre medições (10 minutos ou 1 hora), maior será a tendência de os valores de *clearness index* permanecerem agrupados, tendo em conta a eliminação de pontos isolados - em que o valor de irradiância medida é superior ao teórico extraterrestre - apenas possíveis de identificar com um intervalo de análise menor, como é o caso da representação da Figura 36. Ainda assim, a utilização de valores médios diários ou mensais permite estabelecer relações sazonais relacionadas com a concentração de aerossóis, conforme descrito em [35].

5.2. Campanha Experimental

Foram realizados sucessivos ajustes mecânicos no sentido de encontrar o ponto de equilíbrio que maximizasse, por um lado, a amplitude do movimento, por outro a qualidade do seguimento. A Tabela 5 apresenta as intervenções efetuadas durante a campanha experimental, assim como os principais resultados e conclusões resultantes das alterações efetuadas. A primeira coluna diz respeito ao número do relatório semanal apresentado aos parceiros do projeto e métrica definida para o ajuste mecânico é ilustrada nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39. Algumas das configurações testadas mostraram-se instáveis, o que significa que o painel atingiu uma posição de desequilíbrio, não retomando o seguimento.

Tabela 5 - Intervenções e testes de monitorização efetuados entre Janeiro e Junho de 2015.

N.º	Intervenções	Campanha Experimental	Resultados / Conclusões	
R1	Montagem do protótipo; Instalação do inclinómetro; Instalação dos ibutton	06/02/2015 a 08/02/2015	Reação da temperatura das placas; Movimento do painel (inferior a 4°)	A temperatura das placas uniforme; Existe diferencial de temperatura entre as placas.
R2	Ajuste da tensão das placas; Ajuste da posição das alavancas; Lubrificação do sistema; Instalação de ibuttons	08/02/2015 a 13/02/2015	O painel permaneceu imóvel	A variação da temperatura das placas reflete a intensidade de DNI
R3	Correção de peça fonte do bloqueio da componente mecânica.	20/02/2015 a 23/02/2015	Variação abrupta da posição do painel (50° no eixo de inclinação)	Libertação de tensões acumuladas ou Movimento provocado por ação do vento forte.
R4	Instalação do extensómetro na placa Sul.	27/02/2015 a 04/03/2015	Relação linear entre expansão térmica e $\Delta T_{\text{mastro_placaSul}}$, cerca de 0,05 mm/10 °C.	Necessária recalibração do extensómetro; Temperatura do mastro na base não é representativa da temperatura média.
R5	Variação manual forçada da posição do painel.	04/03/2015	0,008 mm de expansão da barra / 50° de variação da inclinação do painel	Correlação entre a variação da posição do painel e a resposta do extensómetro.
R6	Remoção do painel fotovoltaico para substituição das calhas; Substituição do extensómetro danificado por um novo; Recolocação do ibutton do mastro (lado Norte)	11/03/2015 a 16/03/2015	0,05 mm/ 10°C $\Delta T_{\text{mastro_placaSul}}$	Desfasamento entre os máximos do extensómetro e de ΔT ; Correlação positiva entre expansão térmica e a variação de temperatura do mastro.
R7	Reinstalação do painel	20/03/2015 a 23/03/2015	O painel permaneceu imóvel; Cerca de 0,04 mm/10 °C $\Delta T_{\text{mastro_placaSul}}$.	Correlação positiva entre expansão térmica e diferença de temperatura mastro/placa Sul.
R8	Identificação de batente que impede o movimento; Alavancas: Meio – Meio – Meio ^f Tubo: Centro – Base - Centro Calhas: 7 – 7 – 7	01/04/2015 a 07/04/2015	O painel permaneceu imóvel	
R9	Redução significativa da tração das placas	09/04/2015 a 13/04/2015	O painel moveu-se cerca de 5° no eixo Norte/Sul e 9° no eixo Este/Oeste	A expansão da placa Sul reflete a ação conjunta da distribuição do peso do painel pelas três alavancas e, simultaneamente, da expansão térmica da própria placa; A inércia térmica do mastro é significativa no período da tarde.

^f A sequência indicada é referente a Este, Sul e Oeste.

R10	Revestimento do mastro com folha de alumínio ($\epsilon = 0,1$); Instalação dos extensómetros placa Este e Oeste	16/04/2015 a 20/04/2015	O painel moveu-se cerca de 8° no eixo Norte/Sul e 12° no eixo Este/Oeste; $\Delta L_{\max_{Este}} = 5,5 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,6 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 1,8 \text{ mm}$	Inércia térmica do mastro ainda notória; A variação dos extensómetros instalados nas placas Sul e Oeste correlaciona-se com o $\Delta T_{\text{mastro_placa}}$
R11	Ajuste da tração das placas às 7h	23/04/2015 a 27/04/2015	O painel moveu-se cerca de 4° no eixo Norte/Sul e 7° no eixo Este/Oeste; $\Delta L_{\max_{Este}} = 0,4 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 1,4 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 1 \text{ mm}$	A expansão térmica da placa Oeste correlaciona-se fortemente com a variação de posição do painel segundo os dois eixos
R12	Ajuste de tração das placas às 10h	27/04/2015 a 04/05/2015	O painel moveu-se cerca de 4° no eixo Norte/Sul e 7° no eixo Este/Oeste; $\Delta L_{\max_{Este}} = 0,7 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 1 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 1 \text{ mm}$	
R13	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 7 – 7 – 7 (Ajuste de tração 17h)	13/05/2015 a 18/05/2015	O painel moveu-se cerca de 11° no eixo Norte/Sul e 34° no eixo Este/Oeste; $\Delta L_{\max_{Este}} = 1,4 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 1 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 1,3 \text{ mm}$	Aumento significativo da amplitude de movimento no eixo Este/Oeste; A expansão térmica correlaciona-se com $\Delta T_{\text{mastro_placas}}$
R14 a	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Topo – Base – Centro Calhas: 7 – 3 – 7 (Ajuste de tração 12h)	20/05/2015 a 22/05/2015	Instável $\Delta L_{\max_{Este}} = 1,52 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,39 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 1,98 \text{ mm}$	As configurações testadas não aumentaram a amplitude do movimento.
R14 b	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 6 – 3 – 6 (Ajuste de tração 15h)	22/05/2015 a 25/05/2015	17° no eixo Norte/Sul e 18° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{Este}} = 0,28 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,31 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 1,97 \text{ mm}$	
R15 a	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 6 – 3 – 6 (Ajuste de tração 11h)	27/05/2015 a 29/05/2015	18° no eixo Norte/Sul e 23° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{Este}} = 2,26 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 0,55 \text{ mm}$	O ajuste de tração das barras não alterou significativamente a amplitude de movimento.
R15 b	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 4 – 6 – 4 (Ajuste de tração 15h)	29/05/2015 a 01/06/2015	Instável $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,43 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 0,35 \text{ mm}$	
R16 a	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 6 – 6 – 6 (Ajuste de tração 17h)	01/06/2015 a 03/06/2015	8° no eixo Norte/Sul e 25° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{Este}} = 1,93 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,24 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 0,50 \text{ mm}$	A mesma configuração experimental (alavancas, calhas e tubos) pode mostrar-se instável, dependendo da tração aplicada às placas.
R16 b	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 6 – 6 – 6 (Ajuste de tração 8h)	03/06/2015 a 04/06/2015	5° no eixo Norte/Sul e 16° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{Este}} = 1,64 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,43 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 0,38 \text{ mm}$	
R16 c	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Centro – Base – Centro Calhas: 6 – 6 – 6 (Ajuste de tração 23h)	04/06/2015 a 08/06/2015	Instável $\Delta L_{\max_{Sul}} = 0,30 \text{ mm}$; $\Delta L_{\max_{Oeste}} = 0,51 \text{ mm}$	

R17 a	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Base – Base – Base Calhas: 6 – 6 – 6 (Ajuste de tração 10h)	08/06/2015 a 11/06/2015 e	Instável $\Delta L_{\max_{\text{Sul}}} = 0,54 \text{ mm};$ $\Delta L_{\max_{\text{Oeste}}} = 0,41 \text{ mm}$
R17 b	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Base – Base – Base Calhas: 7 – 7 – 7 (Ajuste de tração 12h)	11/06/2015 a 16/06/2015	6° no eixo Norte/Sul e 10° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{\text{Este}}} = 1,18 \text{ mm}; \Delta L_{\max_{\text{Sul}}} = 0,55 \text{ mm};$ $\Delta L_{\max_{\text{Oeste}}} = 0,69 \text{ mm}$
R18 a	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Base – Base – Base Calhas: 7 – 7 – 7 (Ajuste de tração 15h)	16/06/2015 a 19/06/2015	7° no eixo Norte/Sul e 16° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{\text{Este}}} = 1,98 \text{ mm}; \Delta L_{\max_{\text{Sul}}} = 0,27 \text{ mm};$ $\Delta L_{\max_{\text{Oeste}}} = 1,09 \text{ mm}$
R18 b	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Base – Base – Base Calhas: 7 – 7 – 7 (Ajuste de tração 17h30)	19/06/2015 a 20/06/2015 e	Instável
R18 c	Alavancas: Máx – Máx – Máx Tubos: Base – Base – Base Calhas: 7 – 7 – 7 (Ajuste de tração 17h30)	20/06/2015 a ?/06/2015	4° no eixo Norte/Sul e 6° no eixo Este/Oeste $\Delta L_{\max_{\text{Este}}} = 0,94 \text{ mm}; \Delta L_{\max_{\text{Sul}}} = 0,30 \text{ mm};$ $\Delta L_{\max_{\text{Oeste}}} = 0,53 \text{ mm}$

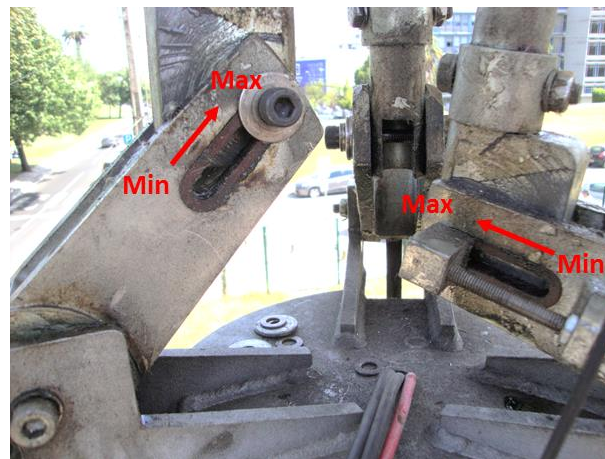


Figura 37 - Ajuste dos braços das alavancas. As setas representam o sentido do deslocamento dos parafusos da posição mínima para a posição máxima

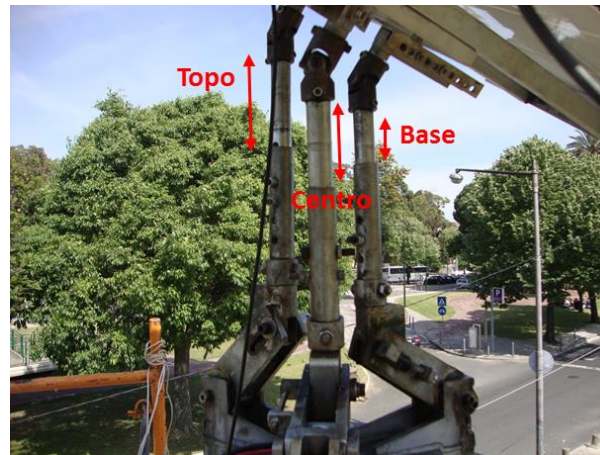


Figura 38 - Ajuste dos tubos. As setas representam as três disposições possíveis dos tubos que estabelecem a ligação entre as alavancas e o painel

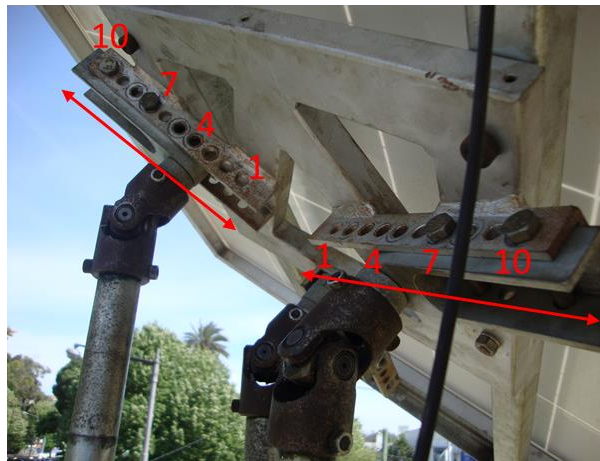


Figura 39 - Ajuste da posição da calha. A posição dos parafusos é contabilizada a partir do interior, podendo variar entre 1 e 10 - o número de furos de cada calha. O parafuso de referência é o mais próximo do centro.

5.2.1. Qualidade do Seguimento

Tomando como referência a posição do sol, estimada em cada momento pela estação meteorológica, descrita em detalhe na secção 4.2.2, apresenta-se na Figura 40 a quantificação da diferença entre o seguimento teórico e o seguimento real do protótipo, ao longo do período de monitorização para as configurações que evidenciam seguimento estável. Esta diferença é calculada tendo em conta a média diária (período compreendido entre as 8h e as 19h), bem como a média de três períodos do dia: de manhã (10h), ao meio-dia solar[§] (13h) e à tarde (17h). Para tal, recorre-se ao produto interno entre vetores, onde λ representa o ângulo formado entre o vetor normal ao sol e o vetor normal ao plano do painel instalado no protótipo, calculado através da equação (37). Quanto menor a amplitude do ângulo, maior o $\cos(\lambda)$, menor a diferença entre o seguimento teórico e real.

$$\cos(\lambda) = \frac{\vec{Sol} \cdot \vec{Segsol}}{\|\vec{Sol}\| \|\vec{Segsol}\|} \quad (38)$$

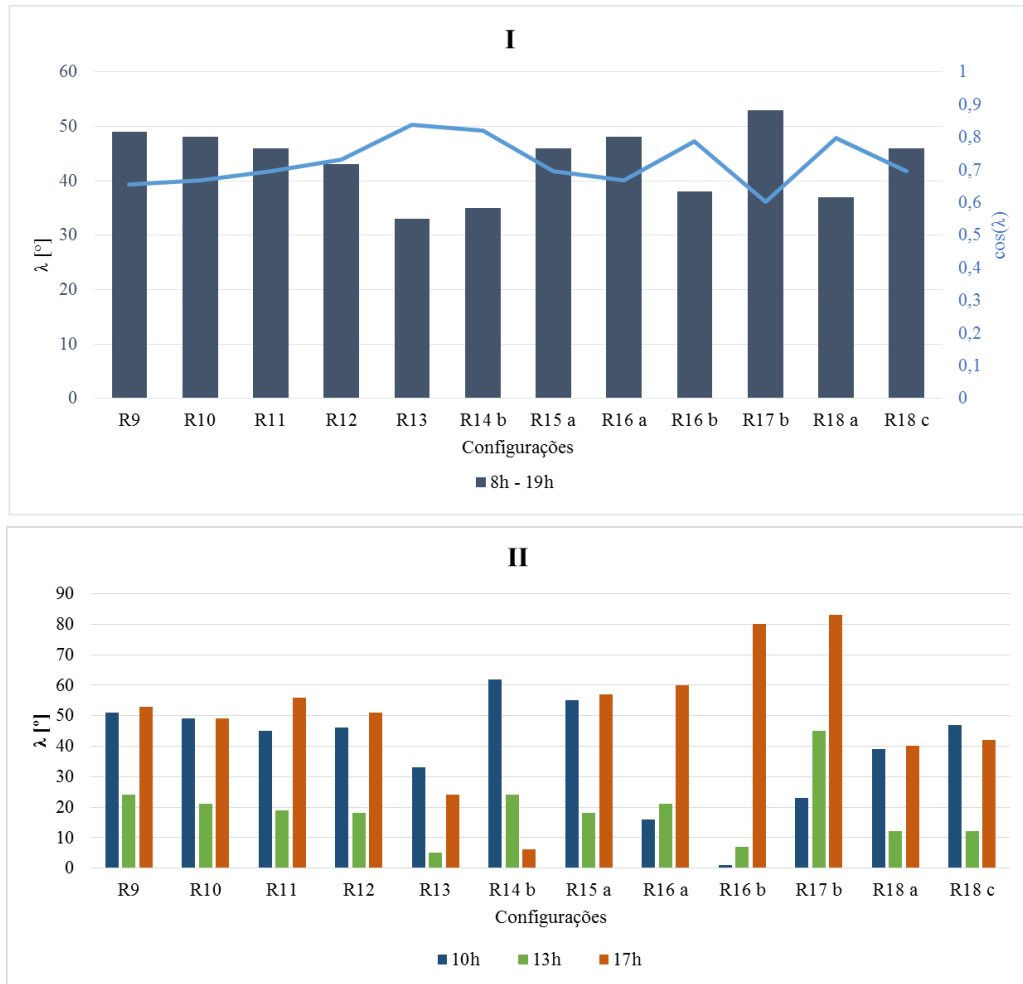


Figura 40 - Quantificação da diferença entre o seguimento teórico e o seguimento real, através do produto interno de vetores – média da diferença entre as 8h e as 19h (I) e para diferentes períodos do dia (II).

[§] Horário de Verão

5.2.2. Configurações R13 e R18 a

Apresentam-se em pormenor, na Figura 41 e na Figura 42, os resultados obtidos da monitorização das configurações R13 e R18 a, respetivamente - dois dos seguimentos mais próximos do seguimento teórico ideal, conforme ilustrado pela diferença de amplitude entre os planos correspondentes. A resposta dos sensores de radiação, temperatura, deslocamento das placas e atitude do painel permite correlacionar os processos físicos, responsáveis pelo seguimento solar. Dias de céu limpo coincidem com os períodos de maior diferença de temperatura entre as placas e o mastro, originando, consequentemente, maior expansão térmica relativa (diferença entre a expansão das placas de alumínio e a expansão do mastro).

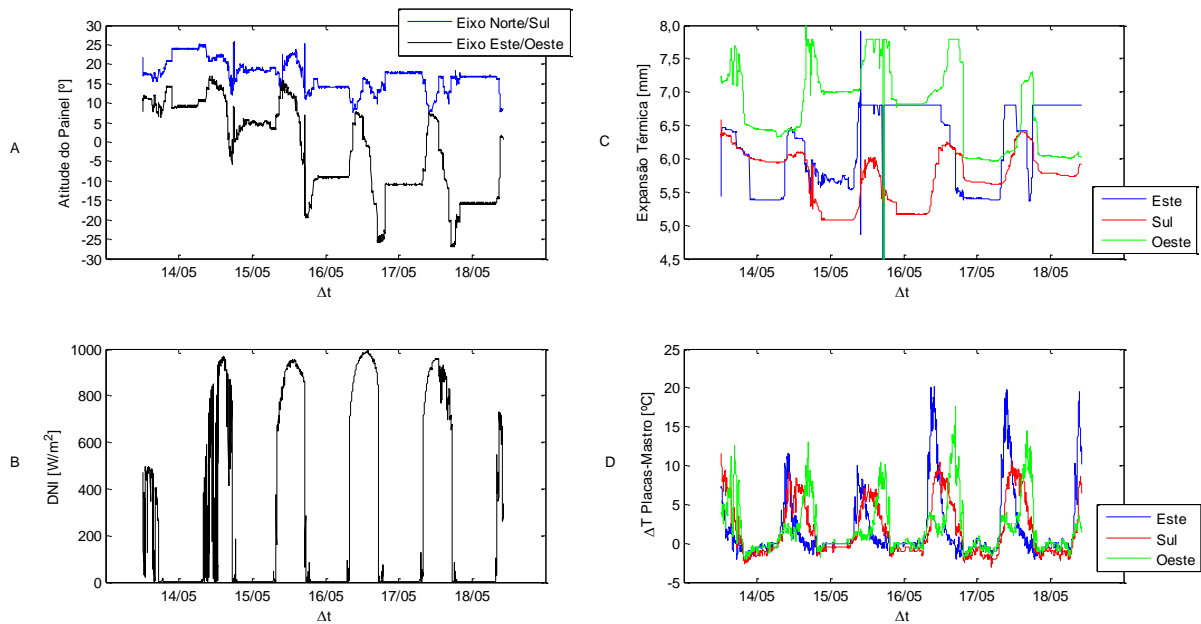


Figura 41 - A: Atitude do painel fotovoltaico instalado no protótipo, segundo o eixo Norte/Sul e Este/Oeste. B: Irradiância no plano normal aos raios solares. C: Expansão térmica das placas Este, Sul e Oeste. D: Diferença de temperatura entre as placas e o mastro. Campanha de monitorização da configuração 13, período compreendido entre 14/05/2015 e 18/05/2015.

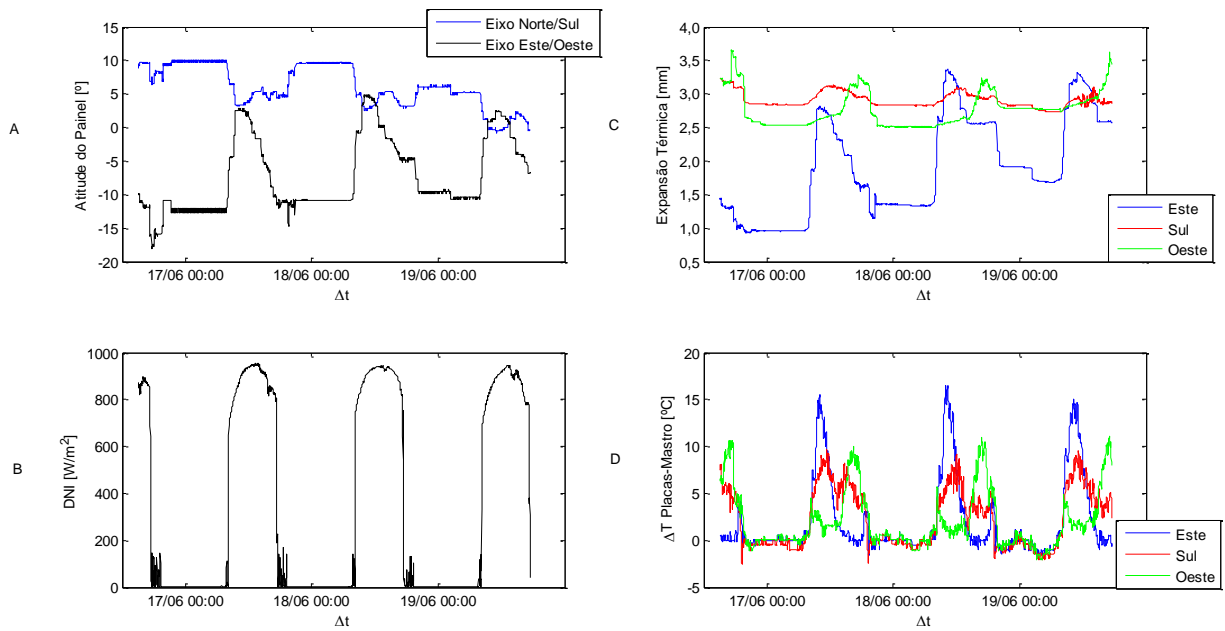


Figura 42 - A: Atitude do painel fotovoltaico instalado no protótipo, segundo o eixo Norte/Sul e Este/Oeste. B: Irradiância no plano normal aos raios solares. C: Expansão térmica das placas Este, Sul e Oeste. D: Diferença de temperatura entre as placas e o mastro. Campanha de monitorização da configuração 18 a, período compreendido entre 17/06/2015 e 19/06/2015.

A posição do painel instalado no protótipo, adquirida através do inclinómetro, pode ser convertida em coordenadas polares – inclinação e ângulo azimutal – tornando, assim, a análise da qualidade do seguimento solar mais intuitiva, através da comparação direta com a trajetória do Sol (uma vez mais toma-se como referência o seguimento solar da estação meteorológica). Os resultados referentes às duas configurações em análise são apresentados na Figura 43.

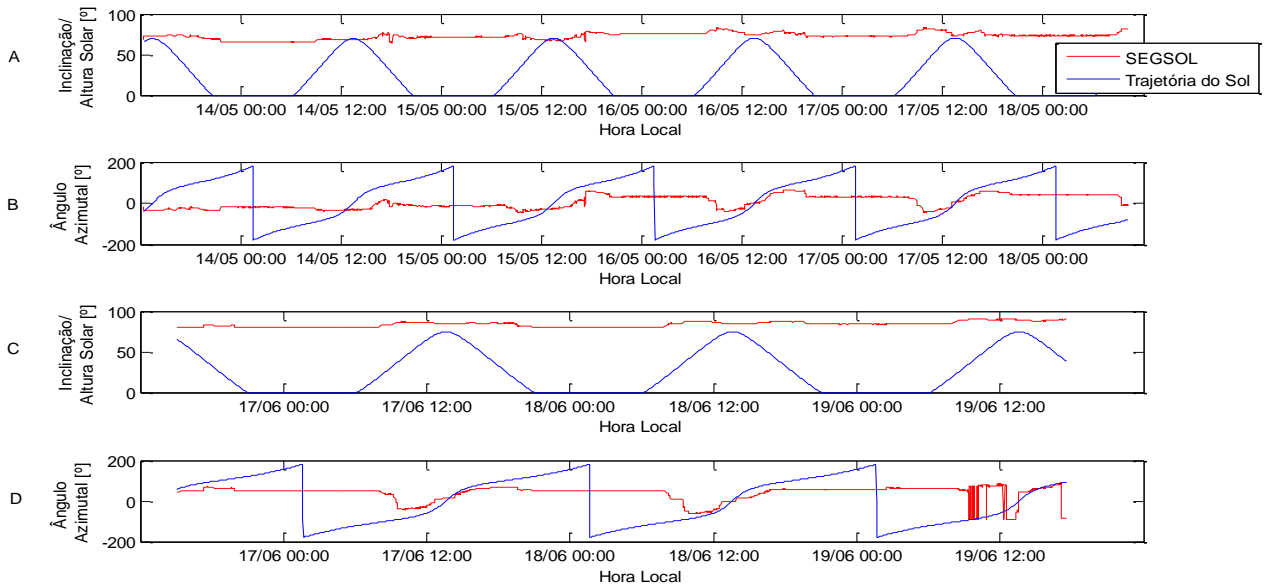


Figura 43 - Qualidade do seguimento solar das configurações 13 (A e B) e 18 a (C e D), através da comparação entre a trajetória do Sol e a trajetória do painel do protótipo.

5.3. Validação do Modelo Teórico

Alterando os *inputs* de temperatura ambiente e de irradiância no modelo desenvolvido, adquiridos a cada minuto pela estação meteorológica, estimou-se para um dia típico de Verão a temperatura das placas e a diferença entre de expansão térmica prevista. A comparação com os resultados das medições efetuadas permitem validar o modelo teórico, no que respeita às componentes de radiação, temperatura e expansão térmica, conforme representado na Figura 44 e Figura 45. Todavia, a complexidade da resposta do seguimento solar do protótipo, bem como as simplificações adotadas, não permitem, para já, validar a componente do modelo relativa à atitude do painel – esta depende simultaneamente da expansão térmica e do equilíbrio de forças entre a distribuição do peso do painel e a tração das placas.

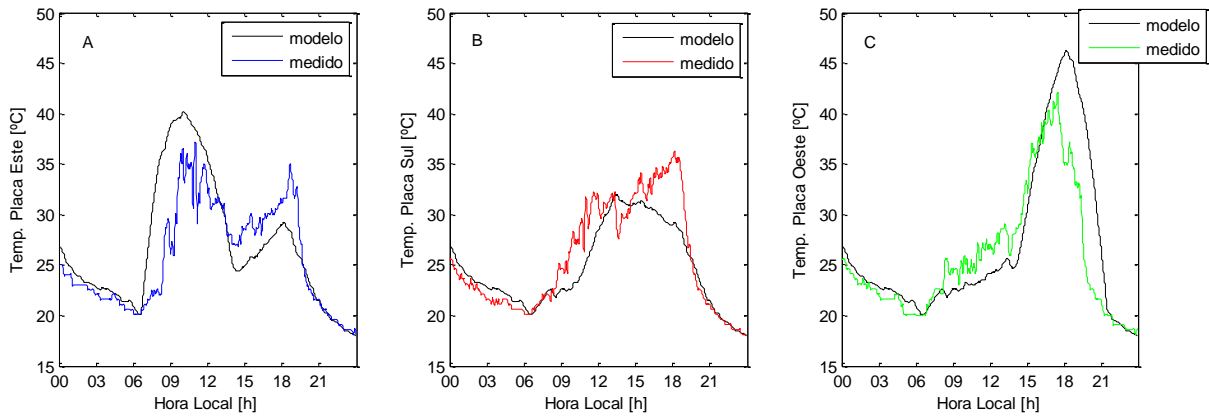


Figura 44 - Comparação entre a temperatura da placa medida e estimada a partir do modelo teórico para a placas orientadas a Este (A), Sul (B) e Oeste (C). Dia típico de Verão: 21/06/2015.

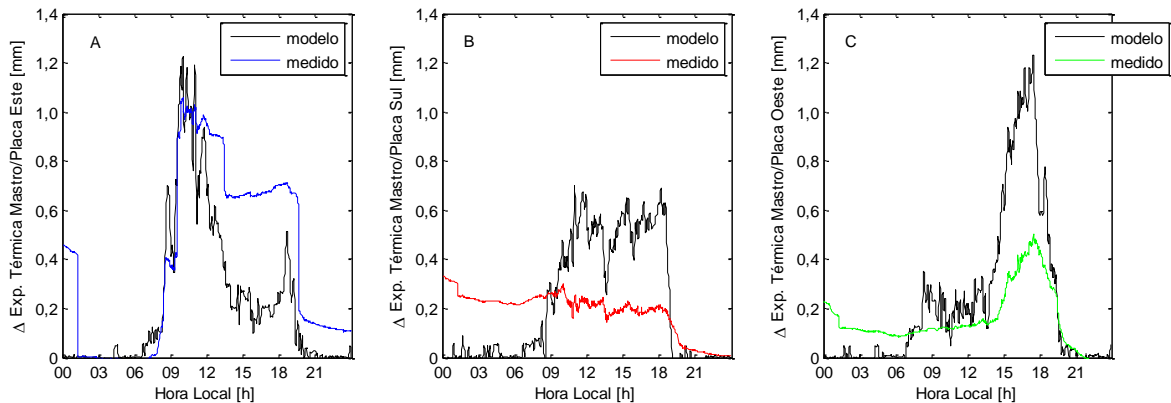


Figura 45 - Comparação entre a diferença de expansão térmica medida e estimada a partir do modelo teórico para a placas orientadas a Este (A), Sul (B) e Oeste (C). Dia típico de Verão: 21/06/2015.

5.4. Caracterização do Desempenho Elétrico

Tendo em conta a impossibilidade de comparar, sob as mesmas condições ambiente, a produção fotovoltaica de dois módulos iguais, um fixo com inclinação e orientação ótimas e um segundo instalado no protótipo, optou-se por comparar dois módulos diferentes, com as especificações definidas na Tabela 4. A Figura 46 A e B apresenta, respetivamente, as curvas de corrente e potência em função da tensão para os dois módulos em diferentes períodos de um dia de campanha.

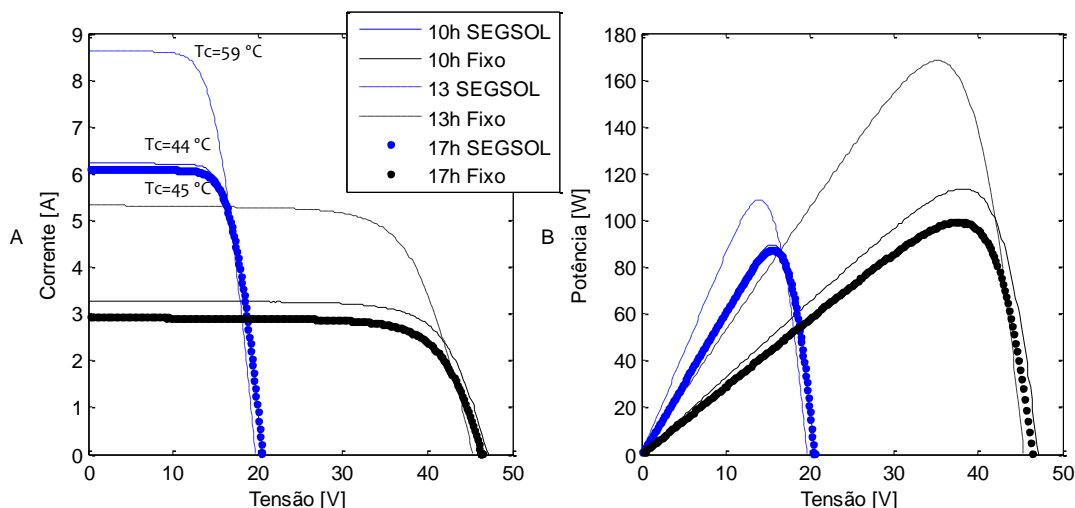


Figura 46 - (A) Comparação das curvas de corrente em função da tensão; (B) potência em função da tensão do protótipo com um sistema fixo com inclinação de 34° e orientado a Sul. Curvas traçadas no dia 18 de Junho de 2015; às 10h, 13h e 17h.

Da análise da densidade de corrente (J_{sc}) dos dois sistemas (quociente entre a corrente de curto circuito e a área do módulo) em função do tempo resulta a representação gráfica da Figura 47 A, onde se verifica maior densidade de corrente do módulo instalado no protótipo, comparativamente com o módulo fixo – a diferença é particularmente notória no final da tarde. No entanto, a densidade de corrente não é, só por si, o melhor indicador, pois o módulo fixo tem uma área maior, penalizando o rácio entre o I_{sc} e a área do módulo. Assim, através da normalização das curvas de densidade de corrente medidas pela densidade de corrente máxima dos módulos em questão, obtem-se a representação da Figura 47 B. Esta permite constatar o desfasamento entre os picos das curvas normalizadas ao meio dia solar, bem como o efeito do seguimento solar no período da tarde.

De acordo com a irradiância estimada pelo modelo teórico, prevê-se que o seguimento imposto pela configuração R18 a aumente a irradiância incidente no painel do protótipo em cerca de 40% às 18h, relativamente ao painel fixo - Figura 47 C.

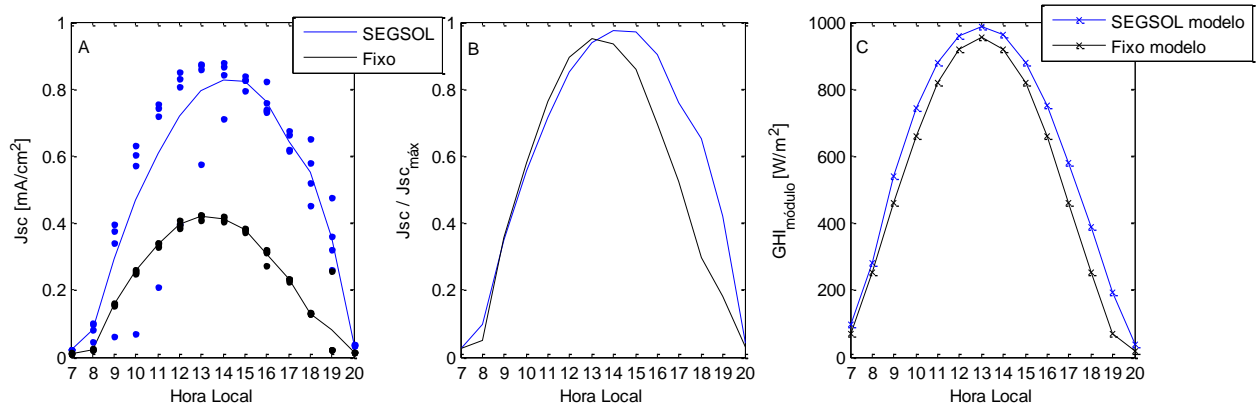


Figura 47 - (A) Comparação horária da densidade de corrente entre o protótipo e o sistema fixo. A curva a cheio representa a média dos 3 dias de campanha (os pontos representam as medições horárias realizadas). (B) Normalização das curvas de densidade de corrente do protótipo e do sistema fixo. (C) Irradiância global teórica prevista pelo modelo teórico para o plano do seguimento e do plano fixo. Intervalo: 17/06/2015 a 19/06/2015.

A integração das curvas da potência máxima dos módulos em função do tempo (ver Figura 48) permite estimar a energia elétrica produzida em média num dia de Junho por cada sistema. A diferença em termos de produção elétrica diária é cerca de 28%. Há que considerar que a potência máxima do painel fixo é 210 W, enquanto a do módulo do protótipo é 150 W.

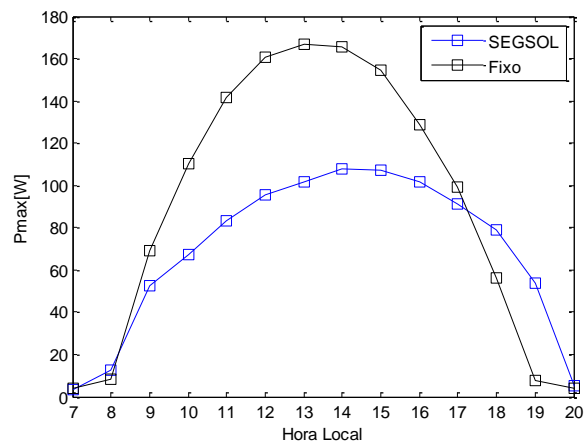


Figura 48 - Média da potência máxima dos módulos fixo e do SEGSQL. Intervalo: 17/06/2015 a 19/06/2015.

A Figura 49 apresenta a energia elétrica diária produzida por cada um dos sistemas por cada Wp de potência instalada, em comparação com a produção elétrica estimada pelo modelo do PVGIS para o mesmo mês. Extrapolando a relação entre as várias configurações para o período de um ano, nomeadamente entre o SEGSQL e o sistema fixo do PVGIS, obtém-se um ganho médio anual de produção de cerca de 20%, a que corresponde cerca de 325 kWh/ano/Wp.

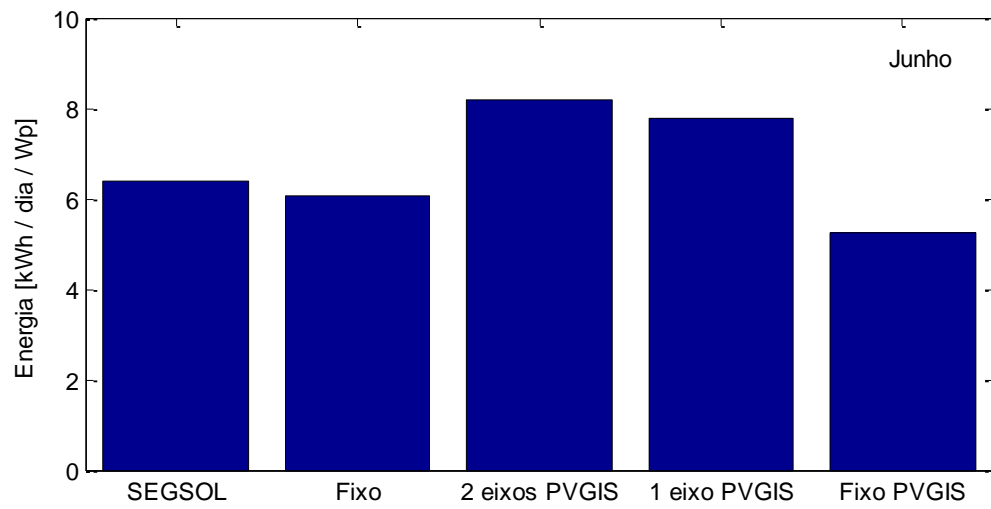


Figura 49 - Comparação da energia diária produzida pelo sistema fixo e de seguimento, em comparação com estimativas do PVGIS para um seguimento de dois eixos, de um eixo inclinado segundo 36° e um sistema fixo com inclinação 34° e orientação Sul.

Capítulo 6 – Discussão

O resultado da análise dos coeficientes utilizados para controlo da qualidade dos dados de radiação (k_t e k_b) permite assegurar a qualidade das medições efetuadas pela estação meteorológica, evidenciando os períodos do dia com maior suscetibilidade de erro associado à medição – o início e o final do dia.

As inúmeras configurações testadas ao longo da campanha experimental demonstram que o ajuste mecânico do protótipo de seguimento solar passivo em estudo não é trivial. Existem diversos graus de liberdade no processo de ajuste que determinam a atitude do painel fotovoltaico. Destacam-se as 10 posições possíveis das calhas de Este, Sul e Oeste que regulam o ponto de apoio do painel; as 3 posições possíveis dos tubos que variam a altura do braço de apoio do painel; o deslocamento de cerca de 5 cm que permite variar o braço das alavancas e, finalmente, a tração aplicada a cada placa. No caso dos ajustes efetuados entre as 9h e as 19h, há que considerar o desequilíbrio térmico das placas.

Os testes efetuados revelam existir um aquecimento diferencial das placas ao longo do dia, em resposta à exposição solar a que cada placa é sujeita, atendendo à trajetória solar. É igualmente evidente a diferença de temperatura entre as placas e o mastro – esta atinge valores da ordem dos 15 °C a 20 °C, pesa embora a componente da inércia térmica do mastro, particularmente importante no período da tarde. A resposta dos extensómetros permite correlacionar o aquecimento e/ou arrefecimento das placas com a expansão e/ou compressão das mesmas, bem como antever a ação conjunta da expansão térmica das três placas (ver Figura 41 e Figura 42). Por outro lado, verifica-se frequentemente que a diferença de expansão térmica (mastro/placa) não coincide no início e no final do dia, conforme seria de esperar, tendo em conta que as placas estão à mesma temperatura, o que poderá ser justificado pelo deslocamento dos sensores ou pela alteração da distribuição de forças, nomeadamente na tração das placas. A diferença de expansão térmica entre o mastro e as placas, da ordem de 1 mm, aproxima-se dos valores previstos pelo modelo teórico (Figura 45).

Devido à multiplicação da expansão das placas pelo sistema de alavancas, verifica-se existir alguma correlação entre o movimento do painel e a variação da posição do Sol. A amplitude máxima alcançada pelo seguimento corresponde à configuração R13, especialmente significativa no eixo Este/Oeste, induzindo um seguimento do azimute solar entre os -42 ° e os 64° - ilustrado na Figura 43 B; o seguimento não é, no entanto, tão evidente para a inclinação. A avaliação da qualidade do seguimento solar das configurações testadas é apresentada na Figura 40, através da comparação do produto interno de vetores. A configuração com menor diferença de amplitude entre o comportamento real e o teórico é R13, com uma diferença média de cerca de 34 °.

Tendo em conta as diferenças entre os dois módulos PV utilizados nos testes de desempenho elétrico, a produção elétrica e a densidade de corrente não podem ser diretamente comparadas. Caso os módulos utilizados nos testes fossem similares poder-se-ia, através da densidade de corrente, função da irradiância captada pelo módulo, comparar os dois sistemas – o fixo e o de seguimento – e estimar, assim, o ganho de energia elétrica entre o protótipo e o sistema fixo utilizado nos testes. Ainda assim, através da normalização da energia elétrica produzida pela capacidade instalada é possível estimar, ainda que por comparação ao modelo teórico do PVGIS, o benefício anual previsto do SEGSOl em relação a um sistema tradicional - cerca de 20%. O aumento da área do painel seria, assim, vantajoso, em termos de custos, pois iria reduzir o custo por unidade de energia.

Capítulo 7 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O protótipo de seguimento solar passivo revelou, em algumas das configurações testadas, um movimento concordante com a trajetória do sol, principalmente no eixo Este/Oeste. O desafio do aumento da amplitude do movimento originou situações de desequilíbrio mecânico, colocando o painel numa posição limite, que inviabiliza o seguimento. Ainda assim, comprova-se a existência de aquecimento diferencial capaz de induzir a expansão térmica das placas de alumínio. O principal entrave ao aumento de amplitude do movimento parece ser o sistema de transmissão entre a expansão das placas e a resposta das alavancas. Ainda assim, a sensibilidade do desempenho do seguimento aos ajustes de tensão das placas poderá levantar problemas para a implementação do protótipo a larga escala, a menos que a tensão aplicada a cada placa (ou a força de tração) seja quantificada e assegurada durante o processo de afinação – através de esticadores, molas e/ou aperto simultâneo com chaves dinamométricas.

A estação meteorológica encontra-se a funcionar em pleno no Campus Solar da FCUL, conforme ilustram os resultados da qualidade dos dados, apresentados para os primeiros meses de operação. O manual de utilização da estação meteorológica, elaborado no âmbito desta dissertação, deverá ser útil, nomeadamente para manutenção e limpeza dos equipamentos.

Por fim, o trabalho futuro consiste na substituição das placas de alumínio por placas constituídas por um polímero (designado PE-HWU) com capacidade de expansão térmica uma ordem de grandeza acima, pelo que se prevê que a expansão térmica passe de 1 mm para 1 cm ($CET = 180 \mu\text{m/m/K}$). Apesar da elevada capacidade de expansão, este polímetro poderá ser danificado quando sujeito a forças de compressão e, no limite, partir. A substituição das placas equivalerá a um aumento da variação de temperatura das placas, pelo que o efeito na amplitude do painel deverá ser melhorado. A avaliação do desempenho elétrico deve ser efetuada comparando a produção PV de dois módulos equivalentes, sob as mesmas condições de operação, estimando assim o ganho de potência pela utilização do seguimento solar passivo. A modelação futura da resposta das alavancas como resultado da combinação dos efeitos de expansão térmica, de equilíbrio das forças de tração das placas e distribuição do peso do painel que, por sua vez, se traduz na estabilidade do seguimento, poderá clarificar qual a configuração que otimiza o funcionamento do protótipo – esta deverá basear-se no estudo do diagrama de esforços.

Referências Bibliográficas

- [1] P. A. Lynn, *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. 2010.
- [2] M. J. Clifford and D. Eastwood, “Design of a novel passive solar tracker,” *Sol. Energy*, vol. 77, no. 3, pp. 269–280, 2004.
- [3] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi, “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1800–1818, 2009.
- [4] FCUL, Active Space Technologies, and Martifer Solar, “SEGSOL Relatório Técnico-Científico n.º 4,” 2014.
- [5] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Seventh Ed. 2011.
- [6] “PV Education.” [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/>. [Accessed: 23-Apr-2015].
- [7] M. Gulin, M. Vasak, and M. Baotic, “Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces,” *17th Int. Conf. Electr. Drives Power Electron. (EDPE 2013)*, no. i, p. 6, 2013.
- [8] “Assignment point.” [Online]. Available: <http://www.assignmentpoint.com/other/assignment-on-solar-radiation.html>. [Accessed: 23-Apr-2015].
- [9] R. Walraven, “On calculating the position of the sun,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 47–52, 1988.
- [10] T. Stoffel, J. Michalsky, and F. Vignola, “Setting up a Solar Monitoring Station,” in *Solar and Infrared Radiation Measurements*, T. & F. Group, Ed. 2012, pp. 273 – 294.
- [11] “Solar radiation model r.sun and its implementation in GRASS GIS.” [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod3.htm>. [Accessed: 05-Jan-2015].
- [12] J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin, J. Page, J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin, J. Page, and W. Linke, “Worldwide Linke turbidity information,” 2010.
- [13] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, “The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation,” 1960.
- [14] Z. Yea, A. Nobre, T. Reindla, J. Luthera, and C. Reiseb, “On PV module temperatures in tropical regions,” *Sol. Energy*, pp. 88:80–7, 2013.
- [15] S. Rustemli, F. Dincer, E. Unal, M. Karaaslan, and C. Sabah, “The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 598–603, 2013.
- [16] N. J. Parmar, A. N. Parmar, and V. S. Gautam, “Passive Solar Tracking System,” vol. 5, no. 1, pp. 138–145, 2015.

- [17] “PVGIS.” [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>. [Accessed: 05-Jul-2014].
- [18] S. Abdallah, “The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, 2003.
- [19] V. Poulek and M. Libra, “New bifacial solar trackers and tracking concentrators,” *Earth*, pp. 1–9.
- [20] “illustration.” [Online]. Available: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>. [Accessed: 12-May-2015].
- [21] “Image.” [Online]. Available: <http://blog.pepperl-fuchs.us/blog/bid/253098/5-Ways-to-Track-Your-Solar-Tracker>. [Accessed: 12-May-2015].
- [22] R. Prinsloo, Gerro; Dobson, *Solar tracking Automatic Solar-Tracking, Sun-Tracking Systems, Solar Trackers and Automatic Sun Tracker Systems*. 2014.
- [23] V. Poulek, “New low cost solar tracker,” *Sol. Energy*, vol. 33, pp. 287–291, 1994.
- [24] C. Li, Y. Liu, X. Huang, and H. Jiang, “Direct sun-driven artificial heliotropism for solar energy harvesting based on a photo-thermomechanical liquid-crystal elastomer nanocomposite,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 22, no. 24, pp. 5166–5174, 2012.
- [25] Active Space Technologies, “Sistema Passivo de Seguimento Solar,” 2011.
- [26] “Patente.” [Online]. Available: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20130325&CC=PT&NR=105900A&KC=A. [Accessed: 28-Jun-2015].
- [27] FCUL, Active Space Technologies, and Martifer Solar, “SEGSOL Relatório Técnico-Científico n.º 3,” 2014.
- [28] “SoDa.” [Online]. Available: <http://www.soda-is.com/eng/index.html>. [Accessed: 20-Dec-2014].
- [29] I. Maxim Integrated Products, “Datasheet Ibutton DS1923,” 2015. [Online]. Available: <http://www.maximintegrated.com/en/products/digital/data-loggers/DS1923.html#popuppdf>. [Accessed: 13-Jun-2015].
- [30] Level Developments Ltd., “Datasheet Inclinator.” [Online]. Available: http://www.leveldevelopments.com/wp/wp-content/uploads/documents/DAS_Inclinometer_Sensor.pdf. [Accessed: 13-Jun-2015].
- [31] “EKO website.” [Online]. Available: <http://eko-eu.com/faqs/photovoltaic-evaluation-systems/i-v-tracers/advantages-of-pyranometers-versus-reference-cell>. [Accessed: 13-Jun-2015].
- [32] “Datasheet Módulo Mprime.” [Online]. Available: <http://www.enfsolar.com/ApolloF/solar/Product/pdf/Crystalline/51c806adb85b1.pdf>. [Accessed: 22-Jun-2015].

- [33] “Datasheet Módulo Sanyo.” [Online]. Available: <http://www.technosun.com/eu/products/solar-module-SANYO-HIP-210NKHE1.php>. [Accessed: 22-Jun-2015].
- [34] L. Menard, L. Wald, M. Geiger, and L. Diabate, “A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation,” *Fuel Energy Abstr.*, vol. 44, no. 6, p. 391, 2003.
- [35] F. Vignola, “GHI Correlations With DHI And DNI And The Effects Of Cloudiness On One-Minute Data,” *World Renew. Energy Forum*, 2012.